

基于 CFD 的风筛式清选装置气流场优化*

李 骅 张美娜 尹文庆 李 豫

(南京农业大学工学院, 南京 210031)

摘要: 为了获得平面振动筛分装置气流场分布规律和优化参数,运用 CFD 软件 Fluent 对风机倾角、风机转速、鱼鳞筛夹角 3 个参数变化时的气流场进行了数值计算和优化,在此基础上应用 Fluent 进行了正交仿真试验。根据试验结果,分析了这 3 个参数对气流场的影响规律,并对气流场进行了优化。优化结果表明:风机倾角对气流清选影响较大,对 4L-1.0 型全喂入收获机的筛分装置而言,风机转速为 700 r/min,离心风机倾角为 25°,鱼鳞筛夹角为 20°时,有利于谷粒与瘪谷的有效分离。

关键词: 平面振动筛 CFD 气流场 优化

中图分类号: S225.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)S2-0012-05

Optimization of Airflow Field on Air-and-screen
Cleaning Device Based on CFD

Li Hua Zhang Meina Yin Wenqing Li Yu

(College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China)

Abstract: To obtain the law and optimize factors of airflow field on the air-and-screen cleaning device, using the CFD software of Fluent, the numerical calculation and orthogonal experiment were implemented by changing three parameters: the obliquity of fan, the rotational velocity of fan, and the included angel of sieve. The influence law was analyzed and the airflow field was optimized by experiments results. The optimized results showed that the obliquity of fan had a great effect on the separation. The mixture of the grain and the blighted grain could be separated efficiently when the obliquity of fan was 25°, the rotational velocity of fan was 700 r/min, and the included angel of sieve was 20°.

Key words: Flat vibrating sieve CFD Airflow field Optimization

引言

在现代联合收获机中,广泛采用平面振动筛及风机进行清选。清选混合物在平面振动筛的激励下,进行上、下分层运动,部分颗粒在接触到筛面时,获得透筛机会。对于形状参数相似的颗粒,主要靠气流场的作用来进行分离。为获得最佳的清选气流场,国内外众多学者在试验台上进行多因素试验,研究气流场的分布规律,并对气流场进行了优化^[1~4]。

近年来,随着计算机性能的提高及 CFD 软件技

术的发展,运用 CFD 技术成为流场研究的重要手段^[5~9]。国内外学者对农业中气液相的流动^[10~12]、航空中气体流场^[13]、医学中人体的呼吸系统与血液循环系统的流场分布进行了探索^[14~15]。国内有不少学者应用 CFD 对气流场进行模拟并用试验进行了验证,从而证明了应用该方法进行风场数值模拟是可行的^[16~19]。

本文应用 CFD 软件,研究 4LZ-1.0 型全喂入联合收获机清选装置主要参数对气流场的影响规律,运用正交仿真试验,对谷物清选时的最佳气流场

收稿日期: 2013-06-26 修回日期: 2013-07-10

* 江苏省农机启动基金资助项目(GXZ05017)和中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(KYZ201126)

作者简介: 李骅,副教授,博士,主要从事农机设计理论与方法研究,E-mail: lihua@njau.edu.cn

通讯作者: 尹文庆,教授,博士生导师,主要从事农机设计理论与方法研究,E-mail: Yinwq@njau.edu.cn

的参数进行优化,获得最佳参数。

1 气流场数值计算基本方程

气体动力学微分控制方程为:
连续方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

运动方程 (Navie - Stokes 方程)

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = \\ & - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u_i' u_j'} \right) + S_i \end{aligned} \quad (2)$$

式中 t ——时间

u_i ——第 i 方向上的速度

u_j ——第 j 方向上的速度

ρ ——流体密度 μ ——动力粘度

p ——静态压力 S_i ——源项

$k-\varepsilon$ 湍流模型在农业机械气固两相流场计算分析中被成功应用^[5,20-21]。因此,本文仍采用它对风筛式清选装置内气流场进行计算,其湍动耗散率 ε 定义为

$$\varepsilon = \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial u_i'}{\partial x_k} \right) \left(\frac{\partial u_i'}{\partial x_k} \right) \quad (3)$$

将湍动粘度 μ_t 表示为湍动能 k 和湍流耗散 ε 的函数,即

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4)$$

k 和 ε 的输运方程为

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \\ & G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \\ & C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \end{aligned} \quad (6)$$

其中

$$G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (7)$$

$$Y_M = 2\rho \varepsilon M_i^2 \quad (8)$$

$$G_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{Pr_i} \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (9)$$

$$\beta = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T} \quad (10)$$

式中 u ——流体流动速度

G_k ——平均速度梯度引起湍动能 k 的产生项

G_b ——浮力产生的湍动能 k 的产生项

Y_M ——可压缩湍流中脉动扩张的共项

σ_k ——湍动能对应 Prandtl 数

σ_ε ——耗散率对应 Prandtl 数

S_k, S_ε ——源项 Pr_i ——湍动 Prandtl 数

β ——热膨胀系数 M_i ——马赫数

模型常数取值^[22] 分别为 $C_{1\varepsilon} = 1.44, C_{2\varepsilon} = 1.92, C_\mu = 0.09, \sigma_{3\varepsilon} = 1.3, \sigma_k = 1.0, Pr_i = 0.85$ 。

2 机构三维几何造型及网格划分

根据 4LZ-1.0 型风筛式清选装置的结构型式,利用 Pro/E 对风筛式清选装置进行绘制简图,如图 1 所示,图中, A 为筛面中点, B 为出风口中心点, α 为风机倾角。为进行分析,构建不同鱼鳞筛夹角 (20° 、 25° 、 30°) 及风机倾角 (20° 、 25° 、 30°) 各种组合共 9 种三维模型。

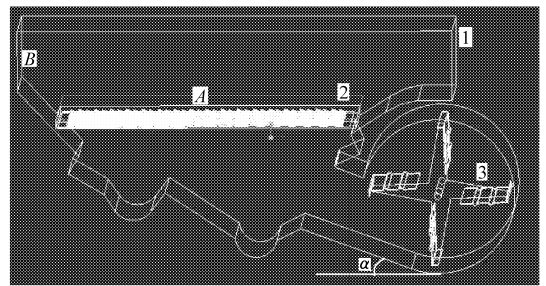


图 1 机构三维几何造型

Fig. 1 3-D geometric modeling of mechanism

1. 壁面 2. 鱼鳞筛 3. 风机

将 Pro/E 中建立的模型导入到 Gambit 软件中,建立风筛式清选装置内部气流通道的模型,进行网格划分。网格的类型和数量对计算结果的准确性具有很大的影响。一般来说,网格数量的增加,计算精度会有所提高,同时计算规模也会增加,综合考虑上述因素,选择适应性非常强的四面体非结构化网格,生成的网格模型如图 2 所示。

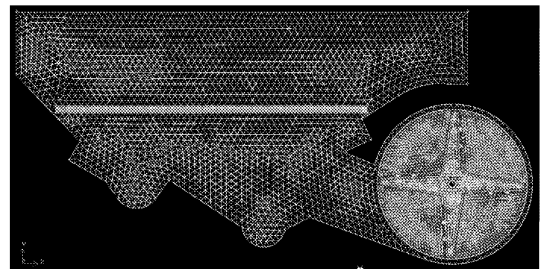


图 2 计算流道及网格结构

Fig. 2 Calculation of flow and grid structure

3 初始条件及边界条件

初始条件下,由于气流场分布状态未知,故气流通道端面均采用恒压力边界条件,内壁采用无滑移壁面条件 ($u_i = 0$)。将 mesh 文件导入到 Fluent 中进行迭代计算,直至稳定为止,通过后处理得到筛面中点及出风口的气流速度。

4 清选装置气流场的优化

4.1 目标函数

在风选机构设计时,根据气流清选原理,要求气流场内压强波动较小,气流场变化稳定,同时在筛面上点的气流速度界于瘪谷与谷粒的飘浮速度之间,而出风口的气流速度则要小于谷粒的飘浮速度。根据相关文献,4LZ-1.0 型全喂入联合收获机清选后的谷物混合物中,超过 80% 的瘪谷没能得到有效地分离^[23],因此在设计气流场时,应将此瘪谷的有效分离作为气流场优化的主要目标。

根据风选理论,筛孔处向上的风速若超过瘪谷的漂浮速度,则瘪谷不能从筛孔落下。另外,若筛孔处风速太大,谷粒通过筛孔受阻,收获机的清选效率降低;当风速过大至超过谷粒的飘浮速度时,则谷粒不能有效通过筛孔。理想状态下,出风口风力应将瘪谷有效吹离的同时保证谷粒不能被吹出,以避免清选损失。根据文献[24],谷粒的漂浮速度为 9.8~11.8 m/s,瘪谷的漂浮速度为 0.6~5.0 m/s,短茎秆飘浮速度为 5.0~6.0 m/s^[24]。因此,筛孔出口风速及出风口风速在满足 $6\text{ m/s} < v < 9.8\text{ m/s}$ 的条件时,谷粒及瘪谷能得到有效筛分。

4.2 正交试验方案及试验结果

为获得风机转速、风机倾角及鱼鳞筛夹角的最佳组合,进行三因素三水平正交仿真试验(表 1),分别考察筛面中心筛孔处(A 点)的风速及出风口中心(B 点)的风速。

表 1 正交试验因素水平

水平	因素		
	风机倾角	转速	鱼鳞筛夹角
	$X/(^{\circ})$	$Y/\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$	$Z/(^{\circ})$
1	20	700	20
2	25	750	25
3	30	800	30

根据正交试验表,在 Fluent 中安排 9 组数值模拟计算,试验分组及计算结果如表 2 所示。

4.3 试验数据分析处理

4.3.1 试验数据图形化显示

为便于综合选择,将考察指标随因子水平变化的情况用图形表示,如图 3~5 所示(为了方便查看,将各点用直线连起来,实际上并不一定是直线)。

由图 3 可以看出,风机倾角的变化对气流速度影响比较敏感,倾角增大后气流速度明显增加,倾角增加到 25°后,出风口气流速度增长缓慢。

表 2 仿真试验分组及试验结果
Tab.2 Group and results of simulation

试验号	试验因素			A 点	B 点
	风机倾角 $X/(^{\circ})$	风机转速 $Y/\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$	鱼鳞筛夹 角 $Z/(^{\circ})$	气流速度 $/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	气流速度 $/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
1	20	700	20	2.64	3.03
2	20	750	25	3.30	11.59
3	20	800	30	3.48	9.17
4	25	700	30	4.90	11.32
5	25	750	20	4.31	11.76
6	25	800	25	7.74	13.20
7	30	700	25	9.29	11.80
8	30	750	30	9.12	12.74
9	30	800	20	9.34	12.70

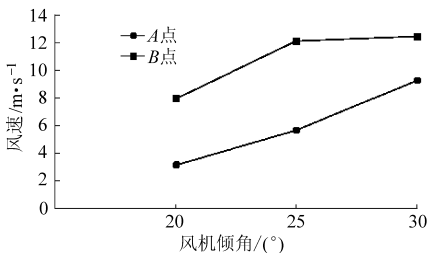


图 3 风机倾角对气流速度的影响

Fig.3 Effect of fan angle on flow velocity

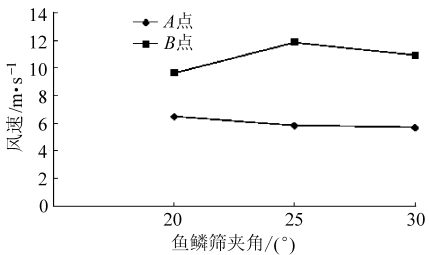


图 4 鱼鳞筛夹角对气流速度的影响

Fig.4 Effect of scaly screen angle on flow velocity

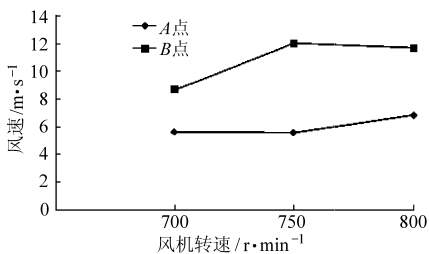


图 5 风机转速对气流速度的影响

Fig.5 Effect of fan speed on flow velocity

由图 4 可以得出,当鱼鳞筛夹角增加时,筛孔中点处气流速度呈下降趋势;而当鱼鳞筛夹角大于 25°后,出风口气流速度也呈下降趋势。

由图 5 可以看出,当风机转速在小于 750 r/min 变化时,转速的变化对出风口气流速度影响明显,对筛孔处气流速度影响不明显;当转速大于 750 r/min 后,转速增加,筛孔处气流速度增加较明显,而出风口气流速度增加不明显。

4.3.2 试验数据极差分析

利用 DPS 软件^[25]对正交试验所得结果进行极差分析。分析结果如表 3、4 所示。

表 3 A 点气流速度极差分析结果

Tab.3 Range analysis results of flow rate in point A					
因子	极小值	水平	极大值	水平	极差 R
风机倾角 X	3.14	1	9.25	3	6.11
风机转速 Y	5.58	2	6.85	3	1.28
鱼鳞筛夹角 Z	5.69	3	6.50	1	0.81

表 4 B 点气流速度极差分析结果

Tab.4 Range analysis results of flow rate in point B					
因子	极小值	水平	极大值	水平	极差 R
风机倾角 X	7.93	1	12.41	3	4.48
风机转速 Y	8.72	1	12.03	2	3.31
鱼鳞筛夹角 Z	9.66	1	11.87	2	2.21

由于试验的衡量指标包括筛孔风速及出风口风速,所以采用综合平衡法来进行处理。把图 3~5 和表 4、5 结合起来分析,综合分析各个因素对指标的影响。对于因素 X 取值,只有取 X_2 时,出风口速度满足要求;因素 Y 值的变化范围较小,考虑到出风口速度不能过大,保证谷粒不能吹出,取 Y_1 ;因素 Z 变化引起的取值范围变化不大,考虑出风口速度不能超过谷粒的飘浮速度,取 Z_1 。按照极差分析得到的损失率主次顺序为 X、Y、Z,最佳方案为 $X_2Y_1Z_1$,即风机倾角 25°、风机转速 700 r/min、鱼鳞筛夹角 20°时有利于瘪谷的清选。

4.3.3 优化方案数值计算

由于得出的最优组合在正交试验表中未出现,所以进行验证试验,按照最优方案 $X_2Y_1Z_1$ 在 Fluent 中安排仿真试验,得到 A 点气流速度为 4.53 m/s, B 点气流速度为 9.42 m/s。最优方案仿真试验结果好于正交试验表中存在的组合,故选择组合 $X_2Y_1Z_1$ 作为最优气流场的参数组合。

优化后,清选室内气流场的速度矢量图、速度云图、总压力图如图 6~8 所示。

从图 6~8 可以看出,在风机的作用下,风扇中心轴处形成负压区,气流从主风扇两端流入,在风道与风扇滚筒的交界处,气流作离心运动,气流沿风扇叶片的切线方向形成比较流畅的气流场,在鱼鳞筛

网处气流的大小和方向发生改变,鱼鳞开口处速度聚集,气流出风口后,向着宜于将杂物吹出方向流出。

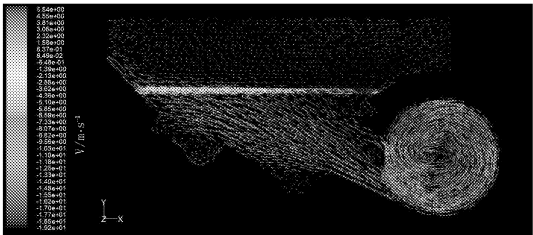


图 6 优化后清选室气流场速度矢量图
Fig.6 Velocity vector map of simulated result

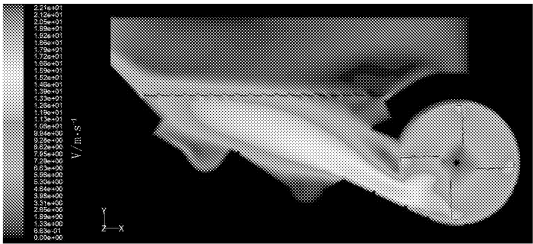


图 7 优化后清选室气流场的速度云图
Fig.7 Speed cloud map of simulated result

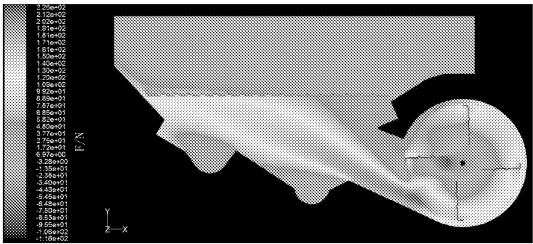


图 8 优化后清选室的压力分布
Fig.8 Total pressure map of simulated result

5 结论

- (1) 应用 CFD 软件 Fluent 对风筛式清选装置的清选气流进行了数值计算,计算出气流场中筛面中点及出风口的速度。
- (2) 运用正交回归仿真试验,分析了风机倾角、风机转速、鱼鳞筛夹角对筛分的影响,风机倾角的变化对筛面中点及出风口的气流速度影响最大。
- (3) 试验优化的最佳参数组合为:风机倾角 25°、风机转速 700 r/min、鱼鳞筛夹角 20°。在 Fluent 中对优化结果进行数值模拟,其速度矢量图、速度云图及总压力图表明,该优化结果达到预期要求。

参 考 文 献

1 邹必昌,彭三河,汤小凝. 谷物清选机构主要参数优化设计试验研究[J]. 湖北农学院学报, 2003, 23(2): 108~112.
Zou Bichang, Peng Sanhe, Tang Xiaoning. On optimization of the design parameters of grain cleaning mechanism[J]. Journal of Hubei Agricultural College, 2003, 23(2): 108~112. (in Chinese)

2 尹文庆, Kutzbach H D, Wacker P, 等. 圆周振动清粮装置的试验研究[J]. 农业工程学报, 2002, 18(6): 81~83.
Yin Wenqing, Kutzbach H D, Wacker P, et al. Experimental research on cleaning shoe with circular vibrating sieve[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2002, 18(6): 81~83. (in Chinese)

- 3 李耀明,唐忠,李洪昌,等. 风筛式清选装置筛面气流场试验[J]. 农业机械学报, 2009, 40(12): 80~83.
Li Yaoming, Tang Zhong, Li Hongchang, et al. Experiment on the flow field of the air-and-screen cleaning device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(12): 80~83. (in Chinese)
- 4 李耀明,赵湛,陈进,等. 风筛式清选装置上物料的非线性运动规律[J]. 农业工程学报, 2007, 23(11): 142~147.
Li Yaoming, Zhao Zhan, Chen Jin, et al. Nonlinear motion law of material on air-and-screen cleaning mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(11): 142~147. (in Chinese)
- 5 李洪昌,李耀明,徐立章,等. 风筛式清选装置气流场的数值模拟与分析[J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2010, 31(4): 378~382.
Li Hongchang, Li Yaoming, Xu Lizhang, et al. Numerical simulation and analysis on flow field of air-and-screen cleaning mechanism[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2010, 31(4): 378~382. (in Chinese)
- 6 Gerald S, Ranganathan P, Sivaraman S. CFD modeling of gas-liquid-solid mechanically agitated contactor[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2006, 86(12): 1331~1344.
- 7 Thomas Glatzel, Christian Litterst, Claudio Cupelli, et al. Computational fluid dynamics (CFD) software tools for microfluidic applications—a case study[J]. Computers and Fluids, 2008, 37(3): 218~235.
- 8 Zhou L J, Wang Z W. Numerical simulation of cavitation around a hydrofoil and evaluation of a RNG $k-\varepsilon$ model[J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2008, 130(1): 011302–011302–7.
- 9 Li Y, Nielsen P V. CFD and ventilation research[J]. Indoor Air, 2011, 21(6): 442~453.
- 10 Alvarado A, Sanchez E, Durazno G, et al. CFD analysis of sludge accumulation and hydraulic performance of a waste stabilization pond[J]. Water Science and Technology, 2012, 66(11): 2370~2377.
- 11 孙国祥,汪小昆,丁为民,等. 基于 CFD 离散相模型雾滴沉积特性的模拟分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(6): 13~19
Sun Guoxiang, Wang Xiaochan, Ding Weimin, et al. Simulation analysis on characteristics of droplet deposition base on CFD discrete phase model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(6): 13~19. (in Chinese)
- 12 Siddiqui M, Jayanti S, Swaminathan T. CFD analysis of dense gas dispersion in indoor environment for risk assessment and risk mitigation[J]. Journal of Hazardous Materials, 2002, 209~210: 177~185.
- 13 Defraeye T, Blocken B, Koninckx E, et al. Aerodynamic study of different cyclist positions: CFD analysis and full-scale wind-tunnel tests[J]. Journal of Biomechanics, 2010, 43(7): 1262~1268.
- 14 Chan B T, Lim E, Chee K H, et al. Review on CFD simulation in heart with dilated cardiomyopathy and myocardial infarction[J]. Computers in Biology and Medicine, 2013, 43(4): 377~385.
- 15 Tan J, Huang J, Yang J, et al. Numerical simulation for the upper airway flow characteristics of Chinese patients with OSAHS using CFD models[J]. European Archives of Oto-Rhino-Laryngology, 2013, 270(3): 1035~1043.
- 16 袁寿其,梁赟,袁建平,等. 离心泵进口回流流场特性的数值模拟及试验[J]. 排灌机械工程学报, 2011, 29(6): 461~465.
Yuan Shouqi, Liang Yun, Yuan Jianping, et al. Numerical simulation and experiment on characteristics of centrifugal pump inlet recirculation[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2011, 29(6): 461~465. (in Chinese)
- 17 马清亮,王维新,刘克毅,等. 软摘锭采棉机摘头三维流场的数值模拟及试验研究[J]. 石河子大学学报: 自然科学版, 2011, 29(6): 762~766.
Ma Qingliang, Wang Weixin, Liu Keyi, et al. Experiment and numerical simulation on three-dimensional turbulence air flow of the brush-roll stripper[J]. Journal of Shihezi University: Natural Science Edition, 2011, 29(6): 762~766. (in Chinese)
- 18 刘利娜,邹建煌,马重夫,等. 空调器离心风机内流场的 PIV 试验与 CFD 仿真对比分析[J]. 流体机械, 2011(7): 60~64.
Liu Li'na, Zou Jianhuang, Ma Chongfu, et al. Analysis by PIV measurement and CFD simulation of internal flow field of centrifugal fan of air conditioner[J]. Fluid Machinery, 2011(7): 60~64. (in Chinese)
- 19 陈红意,赵满全. 干燥箱内温度场和气流场的建模仿真与试验研究[J]. 农机化研究, 2012, 34(8): 98~101.
Chen Hongyi, Zhao Manquan. The experimental study and modeling simulation research on the temperature field and the airflow field in the drying oven[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2012, 34(8): 98~101. (in Chinese)
- 20 袁月明,马旭,金汉学. 气吸式水稻芽种排种器气室流场研究[J]. 农业机械学报, 2005, 36(6): 42~45.
Yuan Yueming, Ma Xu, Jin Hanxue. Study on vacuum chamber fluid field of air suction seed-metering device for rice bud-sowing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(6): 42~45. (in Chinese)
- 21 刘坤,蒋恩臣,王立军. 联合收获机惯性分离室内气固两相流数值模拟[J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2006, 27(3): 193~196.
Liu Kun, Jiang Enchen, Wang Lijun. Numerical simulation of gas-particle flow in inertia separation chamber of stripper combine harvester[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2006, 27(3): 193~196. (in Chinese)
- 22 林建忠. 流体力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- 23 李骅,尹文庆,刘恒. 4LZ-1.0 联合收割机排出口组成的测定[J]. 江西农业学报, 2011, 23(9): 171~172.
Li Hua, Yin Wenqing, Liu Heng. Test on effluent compositions of combine harvester model 4LZ-1.0[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2011, 23(9): 171~172. (in Chinese)
- 24 南京农业大学. 农业机械学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1996.
- 25 唐启义. 数据处理系统: 实验设计、统计分析及数据挖掘[M]. 北京: 科学出版社, 2010.