doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.01.023

基于 CFD 的棉纤维长度检测装置吸风口结构优化与试验

常金强[1,2]　王培宇[1,2]　段宏伟[1,3]　张建强[1,3]　刘　康[1,2]　张若宇[1,2]

(1. 石河子大学机械电气工程学院, 石河子 832003; 2. 农业农村部西北农业装备重点实验室, 石河子 832003;
3. 兵团智慧农场数字化装备技术创新中心, 石河子 832003)

摘要: 棉纤维长度是棉花品质检测的关键指标之一。为保证棉纤维检测时处于稳定伸直状态,结合计算流体力学(CFD)和正交试验对自主设计的棉纤维吸风口内部气流场进行数值模拟和优化。通过单因素试验分析吸风口长度、宽度和高度对腔体流场均匀性、气流速度及压力的影响,并通过数值模拟与正交试验优化吸风口参数配置。单因素结果试验表明,较优参数高度为 2.6 ~ 3.0 mm,宽度为 40 ~ 60 mm,长度为 65 ~ 105 mm。确定速度不均匀系数和压力不均匀系数综合加权得分作为评价指标,通过正交优化试验研究影响吸风口内部气流场分布的因素,结果表明,影响气流场均匀性主要因素依次为吸风口长度、高度和宽度。优化后吸风口结构参数组合为:高度 2.8 mm、宽度 50 mm、长度 85 mm。在此组合下,截线 A、B、C 速度不均匀系数相对于 9 种试验平均值分别下降 0.30、0.33 和 0.31,压力不均匀系数下降 0.13、0.21 和 0.21,速度和压力综合加权得分最高达到 99.979 3 和 99.688 9。通过对 35 组棉样图像逐行像素数量对比验证,最优参数组合在 3 组行区间(每个图像按行划分 3 组)的占比分别为 86.44%、46.77% 和 10.61%,表现出最佳棉纤维伸直度,且与数值模拟结果一致。研究结果为棉纤维吸风口气流分布评价方法提供参考以及棉纤维长度精准检测奠定了基础。

关键词: 棉纤维检测; 吸风口; 结构优化

中图分类号: S223.5　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2025)01-0234-11　　**OSID**:

Optimization and Experiment of Suction Inlet Structure of Cotton Fiber Length Detection Device Based on CFD

CHANG Jinqiang[1,2]　WANG Peiyu[1,2]　DUAN Hongwei[1,3]　ZHANG Jianqiang[1,3]　LIU Kang[1,2]　ZHANG Ruoyu[1,2]

(1. *College of Mechanical and Electrical Engineering*, *Shihezi University*, *Shihezi* 832003, *China*
2. *Key Laboratory of Northwest Agricultural Equipment*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Shihezi* 832003, *China*
3. *Innovation Center for Digital Equipment and Technology for Smart Farms*,
Shihezi Production and Construction Corps, *Shihezi* 832003, *China*)

Abstract: Cotton fiber length is one of the key indicators in cotton quality testing. To ensure that cotton fibers remain stable and straight during testing, the airflow field inside a self-designed cotton fiber suction port was numerically simulated and optimized using computational fluid dynamics (CFD) and orthogonal experiments. Single-factor experiments were conducted to study the effects of suction port length, width, and height on the uniformity of the flow field, airflow velocity, and pressure within the cavity. The suction port parameters were optimized through numerical simulation and orthogonal experiments. Single-factor test results indicated that the optimal range for height was 2.6 ~ 3.0 mm, width was 40 ~ 60 mm, and length was 65 ~ 105 mm. Through orthogonal optimization experiments, using the weighted score of velocity and pressure non-uniformity coefficients as evaluation criteria, the factors affecting the airflow field distribution inside the suction port were analyzed. The results showed that the main factors affecting flow field uniformity in order were the length, height and width of the suction port. The optimized suction port structural parameters were as follows: height was 2.8 mm, width was 50 mm, and length was

收稿日期: 2024-08-19　修回日期: 2024-09-11

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD2002400)、兵团科技攻关计划项目(2023AB014、2022DB003)、新疆棉花产业技术体系项目(XJARS-03)和石河子大学高层次人才科研启动项目(CJXZ202104)

作者简介: 常金强(1992—),男,博士生,主要从事棉花品质检测研究,E-mail: changjinq@163.com

通信作者: 张若宇(1980—),男,教授,博士生导师,主要从事数字棉花技术与装备研究,E-mail: ry248@163.com

85 mm. Under this configuration, the velocity non-uniformity coefficients at sections *A*, *B*, and *C* were decreased by 0.30, 0.33 and 0.31 compared with the average test values, and the pressure non-uniformity coefficients were decreased by 0.13, 0.21 and 0.21, respectively. The comprehensive weighted scores for velocity and pressure reached a maximum of 99.979 3 and 99.688 9, respectively. Verification through comparison of pixel counts in 35 groups of cotton sample images by row showed that the optimal parameter configuration had coverage rates of 86.44%, 46.77% and 10.61% in three row intervals (each image divided into three groups by rows), demonstrating the best fiber straightness, which was consistent with the numerical simulation results. The research result can provide a reference for evaluating the airflow distribution in cotton fiber suction ports and lay a foundation for accurate cotton fiber length detection.

Key words: cotton fiber detection; air suction; structural optimization

0　引言

棉花是我国重要的经济作物和战略物资[1]，2023 年全国棉花播种面积 $2.788\,1\times10^{7}$ hm^2，全国棉花总产量 5.618×10^{6} t[2]。棉纤维长度是影响纺纱性能的关键因素，也是棉花质量检验的重要指标之一，因此棉纤维长度快速准确检测至关重要。目前在棉花收购环节，检测棉纤维长度靠人工手扯尺量，劳动强度高，人为因素影响大[3]。自动化检测仪器中 HVI 测试系统较为普及，售价及售后服务昂贵，对使用环境、操作维护人员的要求较高，需要在特定的恒温恒湿的检验室内完成检测[4]，HVI 长度检测原理为梳夹进入测量装置时，在负压气流吸引下伸直平行地进入测试缝，进行光电扫描测取照影曲线[5]，但是吸风口在负压状态下气流分布情况尚不明确，缺少棉纤维伸直程度的评价方法。

国内外学者对基于计算流体力学(CFD)的气流场仿真优化设计进行了大量研究，并取得了显著成果[6-18]。FENG 等[9]通过试验和数值方法研究了关键结构参数对空气分配器阻力系数的影响，结果表明可有效优化空气分配器设计。FU 等[10]优化设计了气送喷粉系统，采用三因素三水平正交试验确定了最佳操作参数组合，使颗粒喷射速度提高到 81.074 m/s，模型中保留的颗粒质量减少到 9.93 g。CHU 等[11]通过仿真和试验方法研究了 4 种不同类型喷嘴，用于压缩空气清洗鲜杏。通过计算流体动力学仿真和压力测试比较分析喷嘴流动特性，确定最佳工作区域。研究结果表明，仿真与试验结合的方法可有效用于鲜杏无水清洗喷嘴分析和设计。ZHANG 等[12]利用计算流体动力学模拟比较了 5 种通风系统设计对室内植物工厂内气候均匀性的影响。结果显示，局部空气通风方法在作物冠层气候均匀性方面有显著改进，尤其是空气流速相对标准偏差(RSD)改善 14.3%。CHEN 等[13]开发了一种微波红外热风滚床干燥机，并利用计算流体动力学技术优化了空气分配装置结构，提高了滚床表面气流和温度分布均匀性。这些研究通过结合仿真与试验方法，探索了气流速度、压力分布、均匀性等因素，并确定了各类设备最佳参数配置。

为设计并优化吸风口结构和运行参数，本文利用 CFD 对吸风口腔体内气流分布进行研究，探究影响气流分布因素，并采用单因素试验与正交试验方法[18]对吸风口参数进行仿真优化设计，探究最佳参数组合方式，以降低棉纤维弯曲对棉纤维长度检测的影响，以期为后续棉纤维长度准确稳定检测提供技术参考。

1　棉纤维吸风口结构

1.1　棉纤维长度检测装置

棉纤维长度检测装置是基于机器视觉的方法检测棉纤维长度指标[19]，如图 1 所示，棉纤维长度检测装置包括梳夹、取样、刷样、视觉检测等模块，通过专用梳夹随机抓取漏出圆孔板表面纤维，取样梳夹夹取棉纤维须丛宽度约为 77 mm，选用超白光学玻璃(透过率 98%，折射率为 1.52)可覆盖棉纤维至根部区域，有利于透射条件下获取棉纤维图像。棉纤维经过稳定取样和刷样后，由滑台模组带动棉样水平移动至视觉检测模块，棉纤维被吸入吸风口双层高透明光学玻璃之间，通过工业相机拍摄负压吸附状态下的棉纤维透射图像，图 2 为棉纤维透射成像示意图。

1.2　物理模型

吸风口结构是棉纤维长度检测装置的重要组成部分，吸风结构由吸风口、吸风腔体及方变圆异径型风管等组成，如图 3 所示。设计嵌入式吸风口、盖板、底板等，其中通风系统由风机、风管以及换向阀组成，一端与风机连接，通过换向阀与吸风口连接。本文设计的吸风腔体为无截面突变模型，减少能量损失，采用风源上置使风源与吸风口腔体不在同一水平面，可使气流有更多的扩散时间和空间，能减少

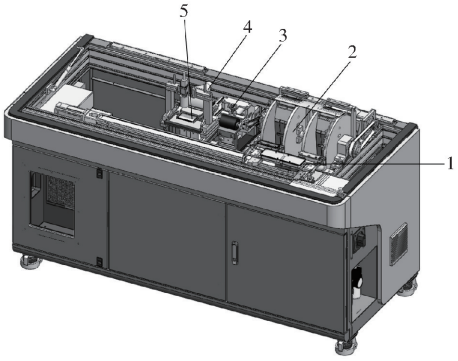

图 1 棉纤维长度检测装置

Fig. 1 Cotton fiber length detection device

1. 梳夹模块 2. 取样模块 3. 刷样模块 4. 视觉检测模块 5. 吸风口

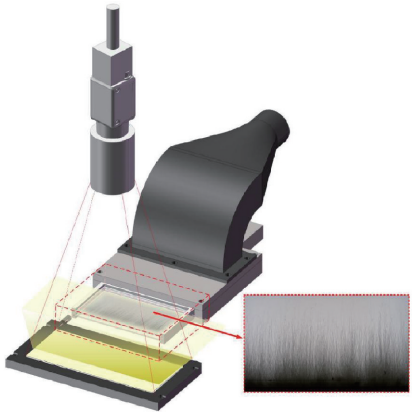

图 2 棉纤维透射成像示意图

Fig. 2 Cotton fiber imaging schematic

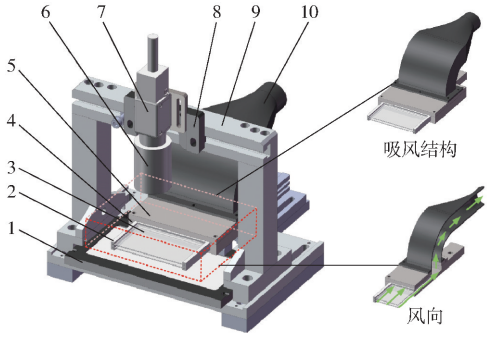

图 3 吸风结构图

Fig. 3 Suction air structure diagram

1. 光源 2. 光学玻璃固定架 3. 光学玻璃 4. 吸风腔体接口 5. 吸风腔体 6. 镜头 7. 相机 8. 相机固定架 9. 相机支撑架 10. 方变圆异径型风管

局部气流过强或紊流现象,优化流动稳定性,从而提高腔体内部流场均匀性。

由于吸风结构安装空间有限,吸风结构尺寸是根据棉纤维长度检测设备中图像采集模块所留空间设计,整体设计紧凑,占用空间小。具体结构参数如表 1 所示。

1.3 数学模型

为简化计算,根据腔体、吸风口结构特点以及棉纤维吸附条件,作如下假设:腔体被视为各向同性连续介质,内部气流均匀。不考虑能量交换和组分转移,气体视为理想、不可压缩、定常流动。流动满足质量、能量和动量守恒定律。在 Fluent 计算中,遵循质量、动量和能量守恒方程,气相连续方程通过 N-S 方程描述,控制方程包括质量守恒方程和动量守恒方程[20],即

表 1 吸风口参数

Tab. 1 Suction port parameters

项目	参数	数值
模块	吸风结构整体尺寸/(mm×mm×mm)	152×106×86
	出风口直径/mm	32
	光学玻璃厚度/mm	1
视觉模块	物距/mm	78
	分辨率/(像素×像素)	3 072×2 048
	视野范围/(mm×mm)	92×61

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \mu_i)=S_m \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial \iota}(\rho \mu_i)+\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \mu_i \mu_j)= -\frac{\partial p}{\partial x_i}+\frac{\partial \boldsymbol{\tau}_{ij}}{\partial x_j}+\rho g_i+F_i \tag{2}$$

式中 ρ——流体密度,kg/m^3

t——时间,s

S_m——质量源项

μ_i、μ_j——均速度分量,m/s

p——静压,Pa

x_i、x_j——各坐标分量

$\boldsymbol{\tau}_{ij}$——应力张量

g_i、F_i——i 方向重力体积力和外部体积力

采用标准 $k-\varepsilon$ 对检测腔体内的气流场进行模拟,湍流动能 k 和湍动能耗散率 ε 计算公式为

$$\rho \frac{\mathrm{d}k}{\mathrm{d}t}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\mu_l+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)+G_k+G_b-\rho\varepsilon \tag{3}$$

$$\rho \frac{\mathrm{d}\varepsilon}{\mathrm{d}t}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left[\left(\mu_l+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i}\right]+C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}(G_k+G_{3\varepsilon}G_b)-C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} \tag{4}$$

其中

$$\begin{cases}\mu=\mu_t+\mu_l\\ \mu_l=\rho C_\mu \dfrac{k^2}{\varepsilon}\end{cases} \tag{5}$$

式中 μ——有效黏性系数

μ_l——层流黏性系数

μ_t——湍流黏性系数

G_k——由层流速度梯度产生的湍流动能

G_b——由浮力产生的湍流动能

C_μ、$C_{2\varepsilon}$——湍流常数,取 0.09

$G_{3\varepsilon}$——湍流扩散率

σ_k——湍动能的湍流普朗特数，取 1.0

σ_ε——耗散率的湍流普朗特数，取 1.3

$C_{1\varepsilon}$、$C_{2\varepsilon}$——经验常数，取 1.44、1.92[21]

2　评价指标

2.1　流场分布云图

CFD 仿真模拟中，速度和压力分布云图是最直观的数据展示方式，通过速度和压力云图可清晰地描述仿真结果，分析气流场不同位置速度与压力分布，从而直观地了解气流场流动特性[8,22-23]。

2.2　速度与压力不均匀系数

进口速度、压力以及腔体不同区域的变化会导致气流轨迹变化，从而使腔体内部压力和速度分布各异。如图 4 所示，依据腔体结构特点，在光学玻璃之间沿径向选取 3 条平行直线 A、B、C 进行评定，其中 A 为入口截线，C 为玻璃末端，B 位于二者中间，并设置 200 个监测点进行数据分析。引入速度和压力不均匀系数来衡量流场均匀性。不均匀系数越大，说明内部流场均匀性越差；反之，则表示流场均匀性较好[24]，速度和压力不均匀系数计算式分别为

$$C_V = \frac{S_V}{\overline{V}} = \frac{\sqrt{\dfrac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(V_i - \overline{V})^2}}{\overline{V}} \tag{6}$$

式中　C_V——速度不均匀系数

S_V——监测点风速标准差，m/s

$\overline{V}$——监测点风速平均值，m/s

V_i——各监测点风速，m/s

n——监测点数量

$$C_P = \frac{S_P}{\overline{P}} = \frac{\sqrt{\dfrac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(P_i - \overline{P})^2}}{\overline{P}} \tag{7}$$

式中　C_P——压力不均匀系数

S_P——监测点压力标准差，Pa

$\overline{P}$——监测点压力平均值，Pa

P_i——各监测点压力，Pa

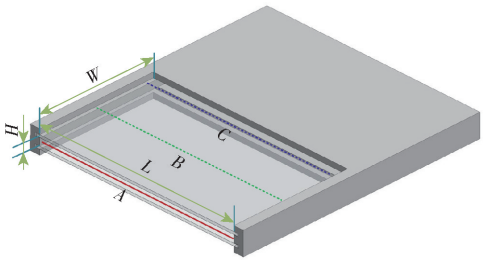

图 4　棉纤维吸风口监测线示意图

Fig. 4　Schematic of cotton fiber air intake

2.3　综合评价指标

由于吸风口负压吸附过程中，各径向截线上存在速度和压力梯度变化，因此采用综合加权评分法，将 3 个截线试验数据转换为单一指标，并据此进行优化[25]。

首先确定各项指标权重。流场分析中，速度、压力不均匀系数是评估流场分布均匀性的重要指标。由于吸风口内部流场分布受到负压影响的程度不同，各指标权重也有所不同。结合主观评估方法和客观评估方法[26-27]，确定 3 个截线 A、B、C 速度和压力不均匀系数权重分别为 0.4、0.3、0.3。计算综合加权评分值为

$$Z_J^{**} = \sum_{I=1}^{3} W_I Z_{I,J}^{*} \tag{8}$$

其中

$$Z_{I,J}^{*} = \frac{Z_{I,\max} - Z_{I,J}}{Z_{I,\max} - Z_{I,\min}} \times 100 \tag{9}$$

式中　Z_J^{**}——第 J 号仿真试验综合加权评分值

W_I——第 I 个指标权重

$Z_{I,J}^{*}$——第 I 个指标 J 号仿真试验值正向标准化值

$Z_{I,J}$——第 I 个指标 J 号仿真试验值

$Z_{I,\max}$——第 I 个指标最大值

$Z_{I,\min}$——第 I 个指标最小值

2.4　试验验证评价

通过分析棉纤维不同吸风口参数下的内部分布情况，以验证方案可行性。图像采集系统及棉纤维透射图像如图 5 所示，随机选取新疆北亭棉业有限公司加工后不同品种皮棉棉样，将棉样在标准环境下（温度：(20 ± 2)℃，相对湿度：(65 ± 3)%）平衡 24 h，使其回潮率保持在 6.5% ~ 8.8% 之间，由于没有被吸风口吸附的棉纤维会回到初始状态，因此分析同一个棉样在不同吸风口方案下图像特征变化规律，放置棉样前使用 YP5002 型电子天平称量，每个皮棉样品称取 8 ~ 12 g，放入取样模块取样，并编号，通过棉纤维视觉检测系统获取背景图像和棉纤维透射图像，通过图像减法获取棉纤维去背景图像，图像尺寸为 2 560 像素 × 1 500 像素。

考虑到棉纤维未充分吸附时会产生大量弯曲纤维，导致纤维间相互遮挡，从而减少相应像素数。基于棉纤维相对伸直度与像素数量成正比，通过逐行求和方式，对不同吸风口方案进行验证，旨在评估各方案对棉纤维吸附效果。为消除图像噪点对像素数量统计的干扰，逐行统计灰度大于 4 的像素。其数学表达式为

$$S_i = \sum_{j=1}^{N} I(i,j) \tag{10}$$

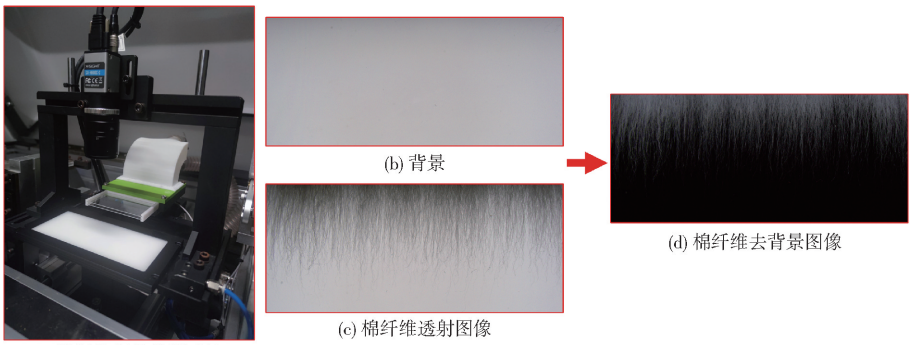

图 5 棉纤维透射成像系统及图像

Fig. 5 Cotton fiber transmission imaging system and image

式中 S_i——第 i 行像素总和

$I(i,j)$——图像中第 i 行第 j 列像素

N——该行总列数(图像宽度)

将去除背景后棉纤维图像特征显著的 301 ~ 900 行区间划分为 3 个组。对于每组,计算棉纤维像素占比,占比越高则表示棉纤维伸直度越好。其数学表达式为

$$R_i = \frac{P_i}{Q} \quad (i = 1,2,3) \tag{11}$$

式中 P_i——对应组棉纤维像素数量

Q——区间像素总数量

R_i——对应组像素占比

3 结果与分析

3.1 网格划分

建立棉纤维吸风结构三维模型,并设定了内部流场区域,采用非结构化网格划分方法对模型进行 Mesh 处理。网格尺寸和数量直接决定求解精度与计算时间。将吸风口模型划分为 8 组,网格数量分别为 19 263、36 560、54 605、105 969、383 789、653 110、1 198 539 和 1 231 012。图 6 为其他条件相同时,随着模型网格细化,监测线 B 气流速度变化情况,通过网格无关性检验,由图 6 可知,当网格数超过点 G 3.8×10^5 后,监测线 B 气流速度变化很小,说明继续增加网格数量对计算结果的影响较小,出口速度趋于平缓,可认为网格数量为 383 789 已经满足仿真要求。因此,按照此网格划分原则符合本文数值模拟要求。

3.2 边界条件设置

将网格模型导入 Fluent 流体仿真软件,依据吸风口腔体特征参数,设置外界大气压为标准值即 1.01×10^5 Pa,设置气动力入口相对压力为 0 Pa,在气动力出口压力为 -7 000 Pa 条件下,棉纤维吸附效果稳定且可靠。利用 $k-\varepsilon$ 湍流模型计算得到吸风腔体内空气流动情况。模型选择风管圆柱口为气体出口,嵌入式吸风口为气体入口,以此探究吸风口结构模型内部流场气流特性及其规律。

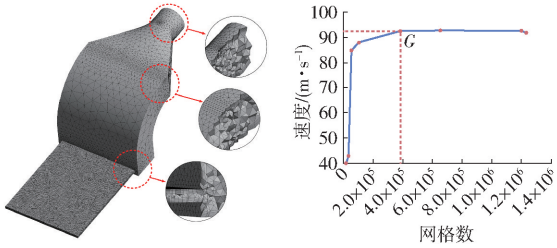

图 6 网格划分及无关性验证

Fig. 6 Grid division and independence verification

表 2 为用于模拟的边界条件设置。进口和出口均假设为逃逸条件,壁面假设为反弹条件。

表 2 吸风口仿真边界条件

Tab. 2 Boundary conditions for air intake simulation

项目	参数	数值
设备仿真	长度/mm	45 ~ 125
	宽度/mm	30 ~ 70
	高度/mm	2.4 ~ 3.2
边界条件	入口压力/Pa	0
	出口压力/Pa	-7 000
	环境压力/Pa	1.01×10^5

3.3 不同因素对气流场的影响

初步确定吸风口尺寸为长 90 mm、宽 55 mm、高 3 mm。通过单因素试验,分析各变量对吸风口气流场的影响。针对每个因素,设置 5 种不同工况,在进风压力固定为 -7 000 Pa 条件下,分别计算 3 条平行直线 A、B、C 平均速度和平均压力,并以标准差作为误差棒。进一步统计速度不均匀系数与压力不均匀系数,用于评估气流场稳定性和均匀性。

3.3.1 吸风口高度对气流场的影响

在吸风口长度 90 mm、宽度 55 mm 条件下,设置吸风口高度为 2.4、2.6、2.8、3.0、3.2 mm 进行单因素试验。由图 7 可看出,压力为 4 365.5 ~ 5 671.7 Pa,速度为84.4 ~ 95.8 m/s,速度波动与压力波动趋势类似,但速度波动范围相对较小,高度对吸风口速

度、压力以及对应的不均匀系数均有较为明显的影响，随着吸风口高度增加，呈速度与压力同步增大，且在 2.8 mm 处趋于稳定，且压力 3.0-C 处存在略微下降，速度和压力的不均匀系数小于 2.8 mm 时波动相对较大，之后逐渐趋于稳定，基本维持在 0.15 以下，流场逐渐稳定。因此初步确定高度为 2.6～3.0 mm。

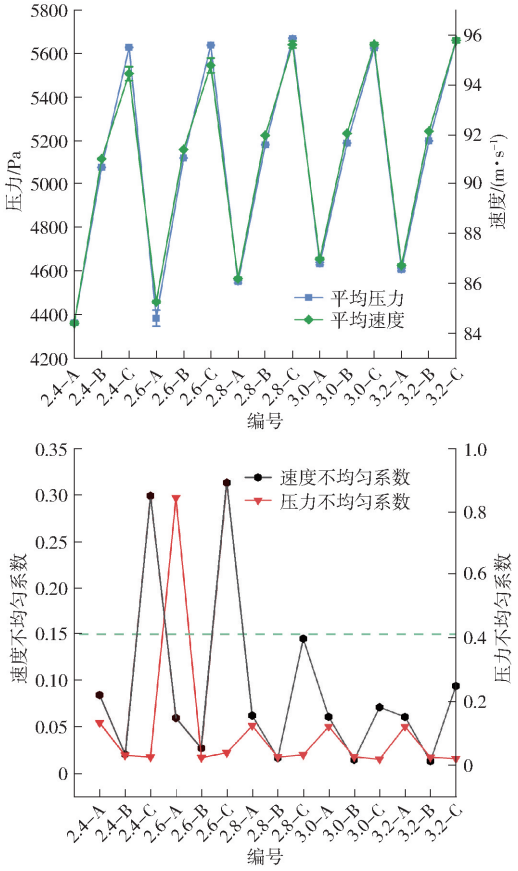

图 7　高度对气流场分布的影响

Fig. 7　Effects of height on airflow field distribution

3.3.2　吸风口宽度对气流场的影响

在吸风口长度 90 mm、高度 3 mm 条件下，设置吸风口宽度 30、40、50、60、70 mm 进行仿真，获得吸风口内部速度、压力和不均匀系数的变化曲线如图 8 所示。由图 8 可知，压力为 5 671.7～5 896.5 Pa、速度为 85.11～96.89 m/s，截线 *A* 速度及压力随着宽度增加逐渐下降，截线 *B* 总体上向下倾斜，变化较为平缓。截线 *C* 压力随着宽度增加逐渐增大，截线 *C* 速度呈先平缓上升后下降趋势。在宽度到达 50 mm 时速度逐渐平缓，在宽度 60 mm 和 70 mm 时速度逐渐下降，可以推测宽度大于一定界限会导致吸风口对棉纤维的吸附能力下降，速度不均匀系数在 50－B 处出现最低为 0.014 6，且速度不均匀系数变化幅度逐渐增大，在宽度 60 mm 处截线 *C* 速度不均匀系数最大为 0.253 6。因此确定宽度为 40～60 mm。

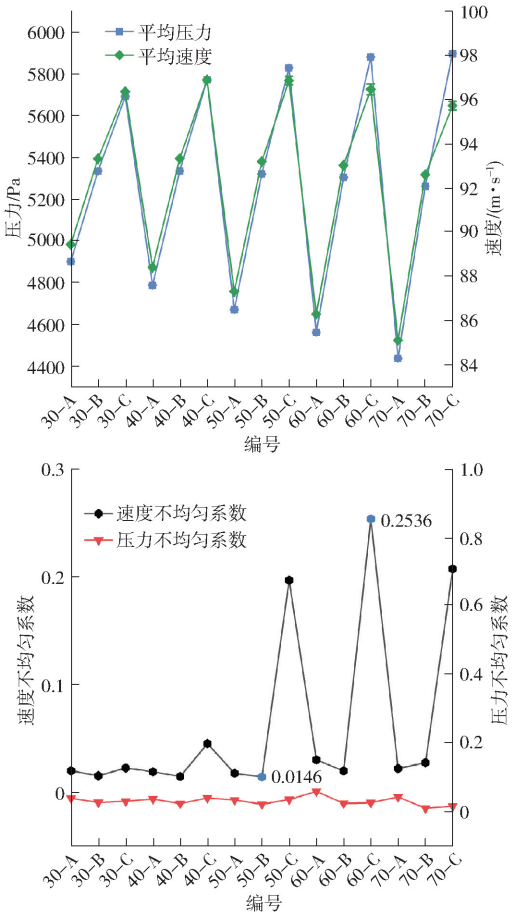

图 8　宽度对气流场分布的影响

Fig. 8　Effects of width on airflow field distribution

3.3.3　吸风口长度对气流场的影响

在吸风口宽度 55 mm、高度 3 mm 条件下，设置吸风口长度 45、65、85、105、125 mm 进行单因素试验。由图 9 可看出，压力为 2 266.1～5 806.8 Pa、速度为 60.8～96.9 m/s，5 组数据平均速度和压力的变化同步，长度在 105、125 mm 处速度和压力均出现明显下降趋势，由此推断随着长度增大，气流场对棉纤维的吸附能力下降。从图 9b 可看出，在长度 85 mm 附近呈现相对稳定区域，在长度 105、125 mm 处速度和压力的不均匀系数逐渐增高，气流场分布趋向不稳定，可推测对棉纤维的吸附相对紊乱，因此确定长度为 65～105 mm。

3.4　吸风口结构及参数优化设计

单因素试验结果表明，吸风口长度、宽度和高度对气流场的分布具有显著影响。为系统地评估各关键因素参数组合对吸风口流场均匀性的影响，采用正交试验设计方法进行分析[28-29]。根据单因素仿真结果确定试验因素为吸风口高度 2.6～3.0 mm、吸风口长度 65～105 mm、吸风口宽度 40～60 mm。确定试验因素水平如表 3 所示，选用 $L_9(3^4)$ 正交表进行仿真计算。仿真方案及结果见表 4，表中 *X*、*Y*、*Z* 表示吸风口因素水平。

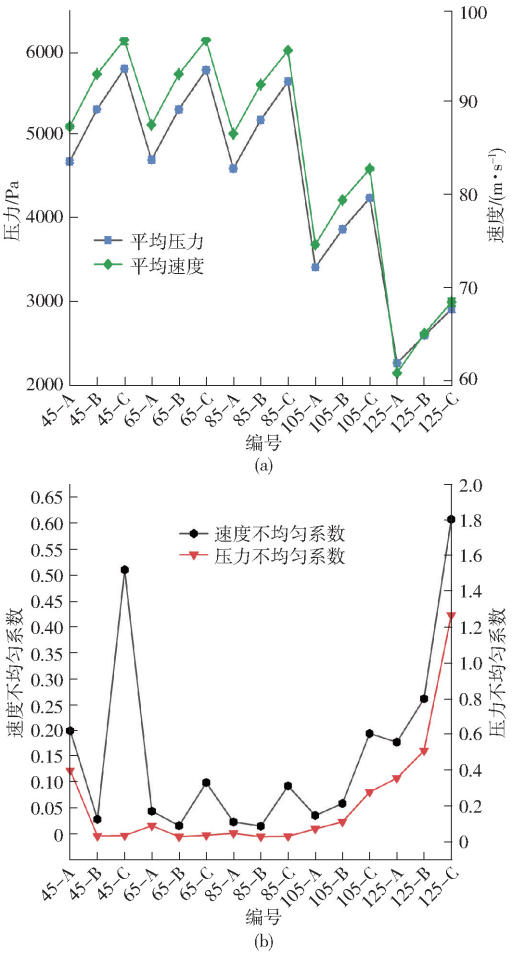

图 9 长度对气流场分布的影响

Fig. 9 Effects of length on airflow field distribution

表 3 正交试验因素水平

Tab. 3 Factors and levels of orthogonal experiment

水平	因素		
	吸风口高/mm	吸风口长/mm	吸风口宽/mm
1	2.6	65	40
2	2.8	85	50
3	3.0	105	60

3.5 试验结果分析

3.5.1 正交试验结果分析

表 4 中 3 个因素的排秩结果显示,吸风口长度对于腔体内部流场均匀性影响最大,吸风口高度次之,吸风口宽度影响效果最小,如图 10 所示,试验 5 速度及压力不均匀系数相对最小,速度不均匀系数 5 - A、5 - B、5 - C 相对平均值下降 0.30、0.33、0.31,压力不均匀系数 5 - A、5 - B、5 - C 相对平均值下降 0.13、0.21、0.21,此试验方案更有利于对棉纤维稳定吸附,气流分布波动最小,说明气流场分布更加稳定,吸附棉纤维时不易抖动。腔体内部流场速度及压力不均匀系数综合加权评分结果进行分析。通过上述数学模型与边界条件以及正交试验参数的确定,实现了吸风口负压过程数值仿真,得到吸风口内部速度及压力分布与各监测点速度、压力。吸风口腔体内部气流速度、压力分布如图 11、12 所示。从图 11c、12c、11f、12f、11i、12i 可以看出,速度及压力分布明显不均匀,腔体内速度及压力偏小,对

表 4 试验设计与结果

Tab. 4 Experimental design and results

试验序号	因素			速度不均匀系数			压力不均匀系数			速度综合加权评分	压力综合加权评分
	X	*Y*	*Z*	截线 *A*	截线 *B*	截线 *C*	截线 *A*	截线 *B*	截线 *C*		
1	1	1	1	0.203 5	0.234 9	0.995 0	0.406 3	0.053 1	0.032 7	32.630 5	59.546 6
2	1	2	3	0.056 4	0.041 0	0.528 3	0.112 7	0.031 4	0.029 3	89.130 2	98.726 9
3	1	3	2	0.109 3	0.154 3	0.610 3	0.218 5	0.316 1	0.992 9	68.038 3	35.192 6
4	2	1	3	0.207 7	0.574 0	1.665 1	0.414 7	0.048 3	0.042 5	0.938 5	58.539 1
5	2	2	2	0.054 3	0.017 0	0.039 4	0.108 5	0.027 2	0.025 5	99.979 3	99.688 9
6	2	3	1	0.148 7	0.213 0	0.507 8	0.297 3	0.423 0	1.033 0	56.751 3	15.916 9
7	3	1	2	0.211 4	0.504 2	1.421 8	0.422 1	0.023 7	0.023 9	8.248 7	60.000 0
8	3	2	1	0.058 2	0.016 6	0.043 5	0.116 3	0.028 0	0.023 9	98.931 0	98.678 8
9	3	3	3	0.081 8	0.115 5	0.660 7	0.163 2	0.216 8	0.970 5	76.201 7	50.383 0
k_{v1}	63.266 3	13.939 2	62.770 9								
k_{v2}	52.556 4	96.013 5	58.755 4								
k_{v3}	61.127 1	66.997 1	55.423 5								
极差	10.709 9	82.074 3	7.347 4								
排秩	2	1	3								
k_{p1}	64.488 7	59.361 9	58.047 4								
k_{p2}	58.048 3	99.031 5	64.960 5								
k_{p3}	69.687 2	33.830 8	69.216 3								
极差	11.639 0	65.200 7	11.168 9								
排秩	2	1	3								

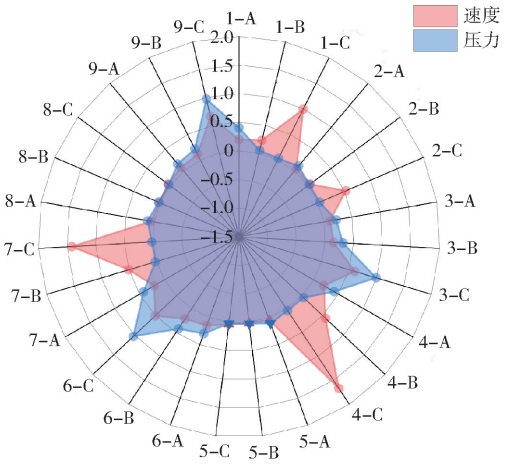

图 10　速度和压力不均匀系数雷达图

Fig. 10　Radar chart of velocity and pressure inhomogeneity coefficients

比其他 6 个试验流场分布较差，对比图 11、12 中其他速度及压力可以看出，前者明显小于后者，且在出口处最为突出，初步分析在于试验均有吸风口长度因素的作用，且其影响较大。对比图 11b、12b，图 11e、12e，图 11h、12h 可以明显看出，腔体内速度及压力逐渐增大，因此，图 11e、12e、11h、12h 压力颜色过渡平滑，分布较为均匀。

正交试验结果表明，前述 3 因素水平速度及压力不均匀系数综合加权评分最优试验为 $X_2Y_2Z_2$，即正交试验中第 5 组，此试验下吸风口腔体内部流场速度综合加权评分为 99.979 3，压力综合加权评分为 99.688 9。

3.5.2　试验验证结果分析

选择对比正交试验中得分较高试验 2、5 和 8，同一个棉样分别用 3 种试验获取棉纤维吸附图像，共获取 35 组棉样图像，将每个图像逐行像素数量求和，并统计 35 组像素数量求和后平均值和标准差，从图 13 看出，试验 5 曲线在最上方，逐行像素求和数量最多，在小于 300 行前像素个数基本一致，说明 3 种试验对根部吸附效果无显著差异，但 300 ~ 900 行之间，可看出试验 5 曲线在最上方，其次为试验 8，试验 2 相对较差，试验 5 相比试验 8 和试验 2 像素个数平均多 82 个和 190 个，从表 5 同时可以看出试验 5 在不同行区间的占比最高，进一步说明当棉

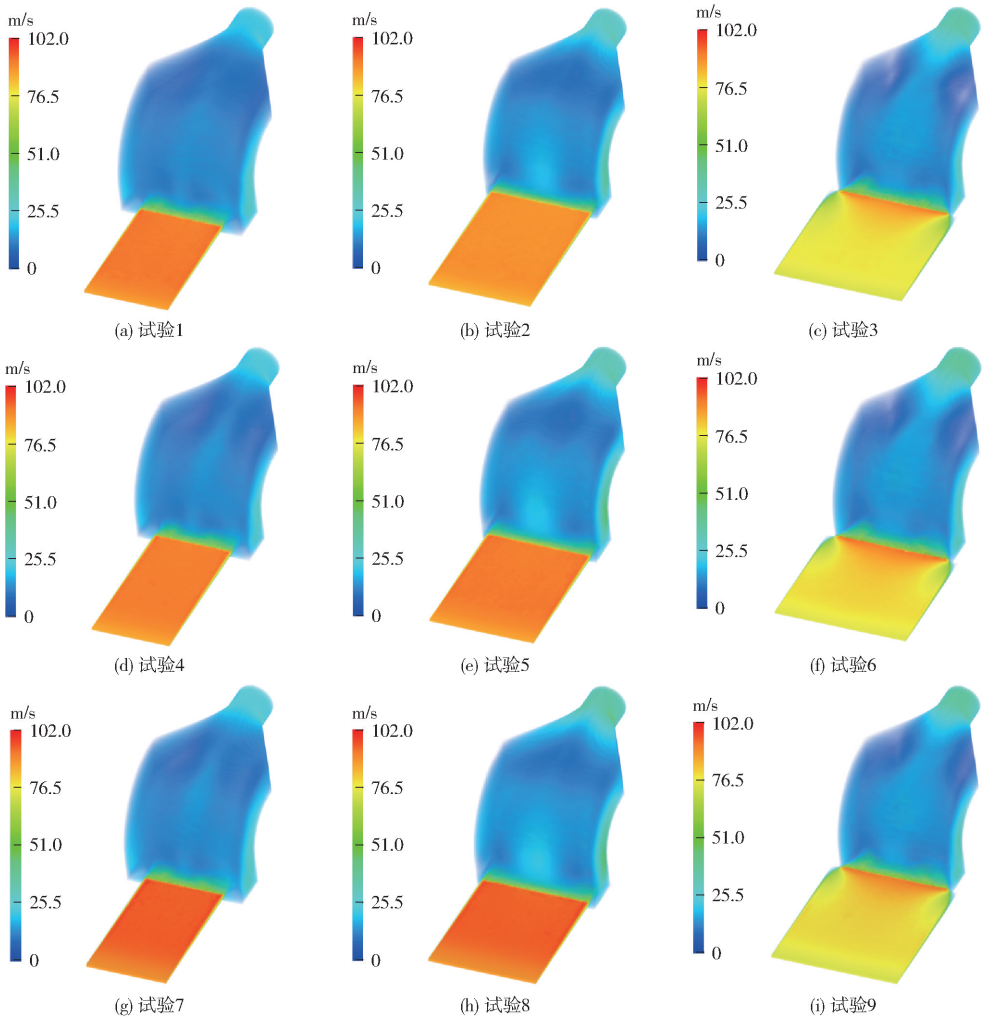

图 11　正交试验 9 组速度云图

Fig. 11　Velocity cloud images of nine schemes in orthogonal experiment

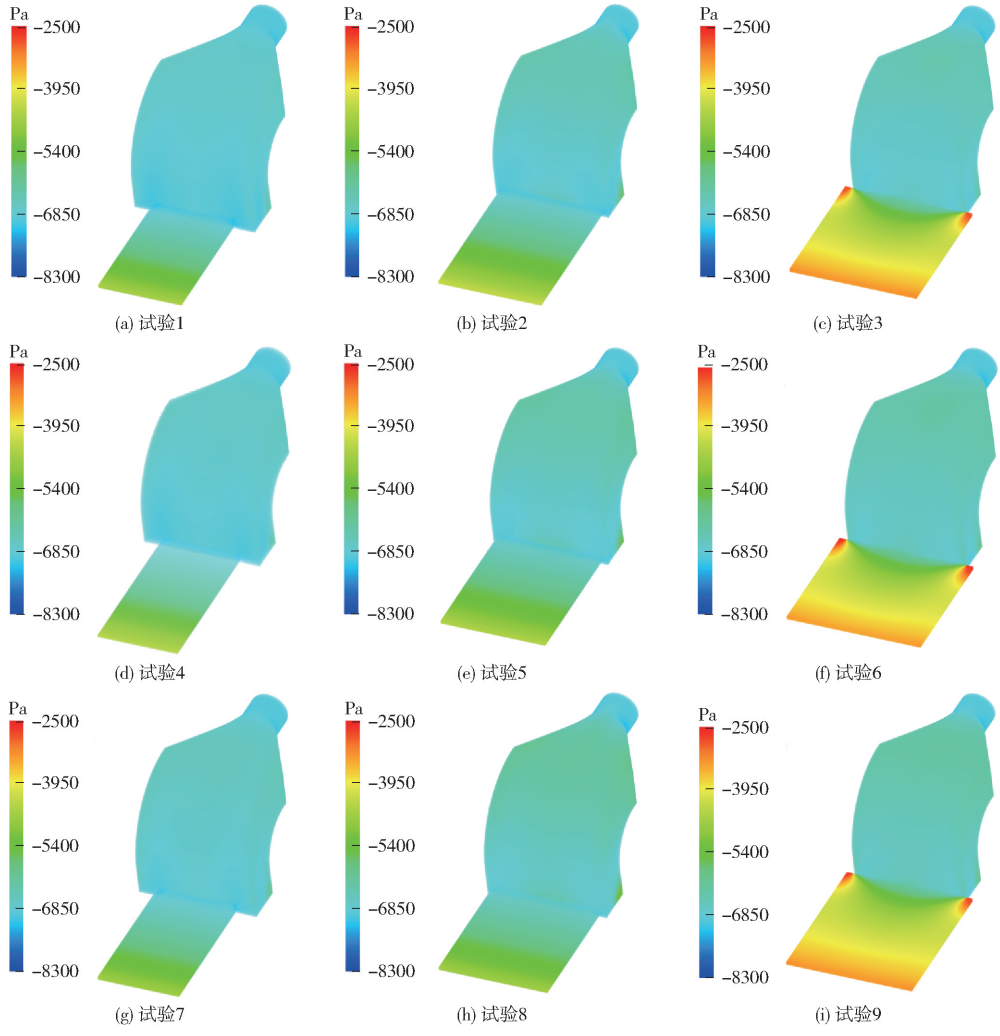

图 12 正交试验 9 组压力云图

Fig. 12 Pressure cloud images of nine schemes in orthogonal experiment

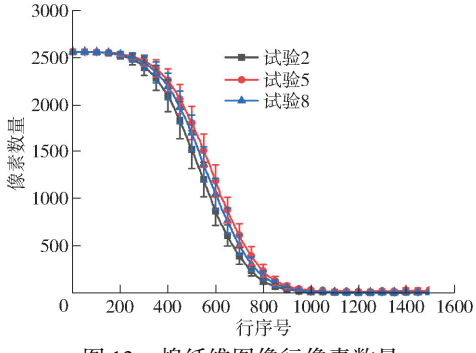

图 13 棉纤维图像行像素数量

Fig. 13 Number of pixels in rows of cotton fiber images

表 5 像素占比

Tab. 5 Pixel ratios %

行序号	试验 2	试验 5	试验 8
301 ~ 500	79. 87	86. 44	83. 98
501 ~ 700	35. 44	46. 77	41. 81
701 ~ 900	6. 23	10. 61	8. 37

纤维在吸风口中被吸附得越直时,纤维之间的遮挡情况显著减少,在图像中棉纤维的像素个数会增加。所以试验 5 吸风口高度 2. 8 mm、长度 85 mm、宽度 50 mm 为最优吸风口试验参数,此时棉纤维相对伸直度最优。

4 结论

(1)棉纤维吸风结构内部气流场仿真结果表明,设计的方变圆异径型风管使得气体进入吸风腔体内时,流场分布均匀,在负压条件下对棉纤维的吸附效果表现出良好的适应性。

(2)单因素试验结果表明,吸风口腔体优化尺寸为:长度 65 ~ 105 mm、宽度 40 ~ 60 mm、高度 2. 6 ~ 3. 0 mm。

(3)通过正交优化试验和极差分析,确定了影响气流场均匀性主要因素依次为吸风口长度、宽度和高度。综合加权评分显示,最优结构参数为长度 85 mm、宽度 50 mm、高度 2. 8 mm。该试验使速度不均匀系数相对平均值分别下降 0. 30、0. 33 和 0. 31,压力不均匀系数相对平均值分别下降 0. 13、0. 21 和 0. 21。

(4)通过对 35 组棉样的试验验证,试验 5 在 300 ~ 900 行区间表现出最优分布,其次为试验 8,试

验 2 相对较差。相比试验 8 和试验 2，试验 5 的像素数量平均提高 82、190 个，并且试验 5 在 3 组行区间占比最高，分别为 86.44%、46.77% 和 10.61%，表明该试验对棉纤维吸附效果最佳。

参 考 文 献

[1] 李军宏，买买提吐尔逊江，王坤锋，等. 中国-中亚五国棉花产业合作可行性分析[J]. 中国棉花，2024，51(5)：61－70.
LI Junhong，TUERXUNJIANG Maimaiti，WANG Kunfeng，et al. Feasibility analysis of cotton industry cooperation between China and the five central Asian countries[J]. China Cotton，2024，51(5)：61－70.（in Chinese）

[2] 陈丽，宋玉兰，王广良. 新疆棉花和纺织服装产业集群高质量发展战略选择[J]. 棉纺织技术，2024，52(5)：89－97.
CHEN Li，SONG Yulan，WANG Guangliang. High-quality development strategy choice of Xinjiang cotton and textile & garment industry cluster[J]. Cotton Textile Technology，2024，52(5)：89－97.（in Chinese）

[3] 郝波，王立平. 手扯尺量法测量棉纤维长度准确性的探讨[J]. 中国纤检，2014(9)：80－81.
HAO Bo，WANG Liping. A probe into the accuracy of hand measuring method for cotton fiber length[J]. China Fiber Inspection，2014(9)：80－81.（in Chinese）

[4] TURNER C，SAYEED M A，HEQUET E. Reconstruction of the cotton fiber length distribution from a High Volume Instrument® fibrogram[J]. Textile Research Journal，2023，93(7－8)：1651－1669.

[5] SAYEED M A，KELLY B R，TURNER C，et al. Investigation of a multivariate correction method for HVI fibrogram measurements[J]. Agronomy，2022，12(2)：460.

[6] 兰凌霄，李凤鸣，王强，等. 基于 CFD 的牧草种子收获机沉降箱体改进设计与试验[J]. 农业机械学报，2023，54(增刊 2)：150－155，172.
LAN Lingxiao，LI Fengming，WANG Qiang，et al. Improvement design and experiment of settlement box of forage grass seed harvester based on CFD[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2023，54(Supp. 2)：150－155，172.（in Chinese）

[7] 廖庆喜，曹梅，王宝山，等. 齿勺气送式芝麻精量集排器设计与试验[J]. 农业机械学报，2023，54(8)：65－76.
LIAO Qingxi，CAO Mei，WANG Baoshan，et al. Design and experiment of slotted-tooth spoon hole and air-assisted precision centralized metering device for sesame[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2023，54(8)：65－76.（in Chinese）

[8] 王传清，倪秀男，魏珉，等. 基于 CFD 的不同通风方式塑料大棚降温效果研究[J]. 农业机械学报，2023，54(1)：351－356，439.
WANG Chuanqing，NI Xiunan，WEI Min，et al. Cooling effect of plastic greenhouse with different ventilation modes based on CFD[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2023，54(1)：351－356，439.（in Chinese）

[9] FENG G，LEI S，GUO Y，et al. Optimisation of air-distributor channel structural parameters based on Taguchi orthogonal design[J]. Case Studies in Thermal Engineering，2020，21：100685.

[10] FU M，ZHANG H，WANG Y，et al. Parameter optimization and experiment of air-fed rubber tree pesticide application device based on CFD－DEM coupling method[J]. Computers and Electronics in Agriculture，2024，225：109247.

[11] CHU H，ZHANG R，QI Y，et al. Simulation and experimental test of waterless washing nozzles for fresh apricot[J]. Biosystems Engineering，2017，159：97－108.

[12] ZHANG Y，KACIRA M. Analysis of climate uniformity in indoor plant factory system with computational fluid dynamics (CFD)[J]. Biosystems Engineering，2022，220：73－86.

[13] CHEN X，WANG D，WANG Y，et al. CFD design and testing of an air flow distribution device for microwave infrared hot-air rolling-bed dryer[J]. Biosystems Engineering，2024，246：204－218.

[14] SANTOLINI E，PULVIRENTI B，TORREGGIANI D，et al. Novel methodologies for the characterization of airflow properties of shading screens by means of wind-tunnel experiments and CFD numerical modeling[J]. Computers and Electronics in Agriculture，2019，163：104800.

[15] 冯雪锋，胡蓉，汪应军，等. 残膜阻隔装置气流分配室射流出口结构优化设计[J]. 农业机械学报，2022，53(增刊 2)：170－178.
FENG Xuefeng，HU Rong，WANG Yingjun，et al. Optimization design of jet outlet structure in airflow distribution chamber of residual film barrier device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2022，53(Supp. 2)：170－178.（in Chinese）

[16] 李海亮，汪春，胡军，等. 气力式水稻穴盘成型机气流分配室流场仿真与优化设计[J]. 农业机械学报，2018，49(4)：94－101.
LI Hailiang，WANG Chun，HU Jun，et al. Simulation and optimum design on airflow distribution chamber of pneumatic forming machine forrice seeding-growing tray[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2018，49(4)：94－101.（in Chinese）

[17] 关卓怀, 江涛, 沐森林, 等. 正负气压式油菜割台分行落粒回收装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(7): 103 - 112, 249.
GUAN Zhuohuai, JIANG Tao, MU Senlin, et al. Development and test of positive and negative pressure combined side knife cutting scattered seed recovery device for rapeseed header[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(7): 103 - 112, 249. (in Chinese)

[18] 高雄发, 施卫东, 张德胜, 等. 基于 CFD 正交试验的旋流泵优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2014, 45(5): 101 - 106.
GAO Xiongfa, SHI Weidong, ZHANG Desheng, et al. Optimization design and test of vortex pump based on CFD orthogonal test[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(5): 101 - 106. (in Chinese)

[19] 张若宇, 韩晨阳, 常金强, 等. 基于机器视觉的棉纤维长度检测装置及应用方法: 202210642908.7[P]. 2022 - 06 - 08.

[20] QI F, ZHAO X, SHI Z, et al. Applicability evaluation of innovative simplified methods of slatted floor in pig houses—a CFD study[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 216: 108532.

[21] HUANG L, MUJUMDAR A S. Numerical study of two-stage horizontal spray dryers using computational fluid dynamics[J]. Drying Technology, 2006, 24(6): 727 - 733.

[22] WANG Y, ZHANG Z, JIANG Y. Based on the CFD technologys negative pressure chamber air flow field simulation analysis of the aspiration drum precision seeding mechanism[J]. Advanced Materials Research, 2013, 706 - 708: 1226 - 1230.

[23] HE S, QIAN C, JIANG Y, et al. Design and optimization of the seed feeding device with DEM - CFD coupling approach for rice and wheat[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 219: 108814.

[24] 李坦, 靳世平, 黄素逸, 等. 流场速度分布均匀性评价指标比较与应用研究[J]. 热力发电, 2013, 42(11): 60 - 63, 92.
LI Tan, JIN Shiping, HUANG Suyi, et al. Evaluation indices of flow velocity distribution uniformity: comparison and application[J]. Thermal Power Generation, 2013, 42(11): 60 - 63, 92. (in Chinese)

[25] 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)

[26] 朱广飞, 白岩松, 王松林, 等. 玉米干储一体仓气流场仿真分析与优化[J]. 农业机械学报, 2023, 54(增刊 1): 381 - 390.
ZHU Guangfei, BAI Yansong, WANG Songlin, et al. Simulation analysis and optimization of airflow field in integrated silo for corn drying and storage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(Supp. 1): 381 - 390. (in Chinese)

[27] SHEN H, LING J, LAN S. Comprehensive evaluation on design scheme of cartesian robot[J]. Przegląd Elektrotechniczny, 2013, 89(3b): 254 - 257.

[28] ZHAO B, HOU D, CHEN H, et al. Optimization design of a double-channel pump by means of orthogonal test, CFD, and experimental analysis[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2014, 6: 545216.

[29] LIU Y, PAN W, LONG Z. Optimization of air supply parameters for stratum ventilation based on proper orthogonal decomposition[J]. Sustainable Cities and Society, 2021, 75: 103291.