

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2022.S2.019

残膜阻隔装置气流分配室射流出口结构优化设计

冯雪峰 胡蓉 汪应军 郝贝贝 杨煜

(石河子大学机械电气工程学院, 石河子 832003)

摘要: 作为残膜阻隔装置关键部件,气流分配室具备优化流场结构、均匀气幕的作用。在气流分配室外部结构受装配空间条件限制难以进一步优化的情况下,射流出口结构参数优化对改善气流分配室内气流分布均匀性具有积极影响。为提高残膜阻隔装置射流气幕均匀稳定性,以速度不均匀系数为评价指标,利用 Fluent 进行单因素试验确定影响因素取值范围,结合二阶响应面法、第二代非支配排序遗传算法(NSGA-II),得出最优参数组合为:射流出口1长度为70 mm、射流出口1宽度为2 mm、射流出口2长度为160 mm、射流出口2宽度为2 mm,此时较原装置,其射流出口速度不均匀系数分别减小28.6%和25.9%。试验结果表明,两射流出口最大速度偏差分别为8.3%和14%,射流出口速度试验值与仿真值分布趋势具有较好的一致性。

关键词: 残膜阻隔装置;射流出口;数值模拟;速度不均匀系数

中图分类号: S223.5; S225.911 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2022)S2-0170-09

Optimization Design of Jet Outlet Structure in Airflow Distribution Chamber of Residual Film Barrier Device

FENG Xuefeng HU Rong WANG Yingjun HAO Beibei YANG Yu

(College of Mechanical and Electronic Engineerings, Shihezi University, Shihezi 832003, China)

Abstract: As a key component of the residual film barrier device, the air distribution chamber has the function of optimizing the flow field structure and uniform air curtain. Under the condition that the external structure of air distribution chamber is difficult to be further optimized due to the limitation of assembly space, the optimization of jet outlet structure parameters has a positive effect on improving the uniformity of air distribution in air distribution chamber. In order to improve the uniform stability of the jet curtain of the residual film barrier device, the velocity nonuniformity coefficient was used as the evaluation index, based on fluent, the range of influencing factors was determined by single factor experiment. Combined with second-order response surface method and non-dominated sorting genetic algorithm-II (NSGA-II), the optimal design parameters were obtained as follows: $X_1 = 70$ mm, $Y_1 = 2$ mm, $X_2 = 160$ mm, $Y_2 = 2$ mm, compared with the original device, the uneven coefficient of jet outlet velocity was reduced by about 28.6% and 25.9%, respectively. The experimental results showed that the maximum velocity deviation of two jet exits was 8.3% and 14% respectively, and the distribution trend of jet exit velocity was in good agreement with the simulation value.

Key words: residual membrane barrier device; jet exit; numerical simulation; nonuniform coefficient of speed

0 引言

残膜阻隔装置利用射流气幕对残膜进入采棉机输棉管的途径进行阻断,气流分配室作为残膜阻隔

装置的重要组成部分,具有优化流场分布,形成稳定均匀气幕的作用。研究表明,流场分布均匀性是影响残膜阻隔装置工作性能的重要因素。因此,探明气流分配室内流速分布规律和流动特性,优化气流

收稿日期:2022-06-10 修回日期:2022-08-08

基金项目:石河子大学创新发展专项项目(CXFZ202004)

作者简介:冯雪峰(1997—),女,硕士生,主要从事农业装备研究,E-mail:1159413441@qq.com

通信作者:胡蓉(1981—),女,教授,博士,主要从事农业机械装备设计研究,E-mail:9849545@qq.com

分配室结构,对于提高残膜阻隔装置的工作性能具有十分重要的意义。

目前已有许多使用数值模拟方法针对气流分配室内部流场分布规律及运动特性进行仿真分析的研究。代建武等^[1]为了改善气流分配室的流场结构、均匀各喷管的流速,运用 Fluent 软件对气流分配室内部流场进行三维数值模拟,得到了热气流在气流分配室内的流动特征,并对气流分配室原模型的结构改进提出了多种优化方法。李海亮等^[2]结合正交试验设计与数值模拟技术对气力式水稻穴盘成型机气流分配室进行优化设计,经优化后,气流分配室结构设计合理,速度分布均匀。吴敏等^[3]通过数值模拟分析发现加入均风板可显著提高气流分配室流场的均匀性。于海明等^[4]通过模拟不同结构参数下气流分配室的流场特征得到气流分配室最佳设计参数的取值范围。CHENG 等^[5]针对多目标多参数下腔室结构设计问题,基于 Isight 平台的一体化设计方法对腔室结构参数(如:出口尺寸、入口尺寸、角度)进行优化设计。LI 等^[6]为了改善干燥机配气室的流场结构,提高气配室出口气流分布的均匀性,基于 CFD 研究了配气室结构对流场分布均匀性的形象,以速度不均匀系数为评价指标得到配气室最优结构参数组合。

针对残膜阻隔装置气流分配室流场改善的研究较少。彭震^[7]虽对残膜阻隔装置的气流分配室结构进行了初步设计,但内部流场存在诸如涡流、速度梯度大等能量损耗现象,且装置外部结构较复杂,加工、安装、装夹困难。此外,由于采棉机底板空间有限,原有装置难以满足采棉机底板空间及外部恶劣工况的需要。

近年来,国内外众多学者将传统的计算流体力学(CFD)与多目标优化方法相结合用于设计、优化装置结构。孔德海等^[8]将 CFD 与 NSGA-Ⅱ相结合,获得了 Pareto 最优解并对 Pareto 最优前沿面上的 4 种最优参数组合进行分析,分析结果表明流动阻力与换热均匀性均有所改善。CHENG 等^[9]为解决旋流骨料干燥煤粉燃烧器多目标多参数腔体在流场作用下的结构设计与优化问题,通过试验方案的设计,确定了影响优化目标的设计参数。采用 NSGA-Ⅱ对非劣解集进行求解,从而实现多目标的综合优化。CHEN 等^[10]提出了一种将正交设计方法与多目标 NLPQL 算法相结合的方法用于发动机结构的优化。ZHANG 等^[11]应用 CFD 方法对翼型的气动参数进行了数值计算,并利用多岛遗传算法(MIGA)、二次拉格朗日非线性规划(NLPQL)的结合对参数进行非线性规划,寻找升阻比最大的翼型。

本研究针对采棉机残膜阻隔装置的气流分配室建立气流场模型,并利用 Fluent 软件对其进行三维数值模拟,研究气流分配室外部结构参数对其内外流场特性的影响,结合三维数值模拟、二阶响应面法、多目标优化等方法实现对装置腔体结构参数的综合优化,并通过试验对仿真结果的准确性与合理性进行验证,以确定气流分配室的最优结构参数。

1 残膜阻隔装置工作原理及气流分配室数值模型建立

1.1 工作原理

残膜阻隔装置安装位于采棉机底板位置,工作时气流由采棉机离心风机吹入风管经引风接头进风口进入气流分配室,并被分配至各射流出口处,形成射流气幕阻断残膜上升途径达到对地表残膜进行阻隔的目的。装置主要由引风部件、气流分配室两部分组成,总体结构设计如图 1 所示,气流分配室结构如图 2 所示,残膜阻隔装置几何参数见表 1。

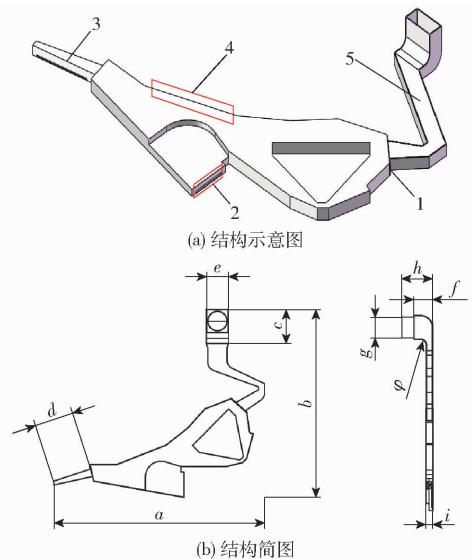


图 1 残膜阻隔装置结构图

Fig. 1 Structure of residual film barrier device

1. 进风口 2. 射流出口 1 3. 喷嘴 4. 射流出口 2 5. 引风管

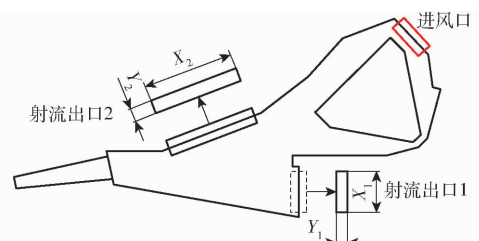


图 2 气流分配室结构示意图

Fig. 2 Structure diagram of air distribution chamber

1.2 网格划分

利用 SolidWorks 构建气流分配室三维模型。利用 Fluent Meshing 对模型进行网格划分,网格类型

表1 残膜阻隔装置几何参数

Tab.1 Geometric parameters of residual film

barrier device		mm	
参数	数值	参数	数值
<i>a</i>	764.5	<i>f</i>	101.5
<i>b</i>	671.2	<i>g</i>	61.5
<i>c</i>	121.5	<i>h</i>	71
<i>d</i>	142.3	<i>i</i>	23
<i>e</i>	80	φ	20

为非结构化四面体网格,对气流进口、出口、装置棱角处及气流量骤然变化处等位置进行局部加密处理以提高计算精度、加快收敛速度,得到物理模型网格总数约为144 340个,网格划分结果如图3所示。

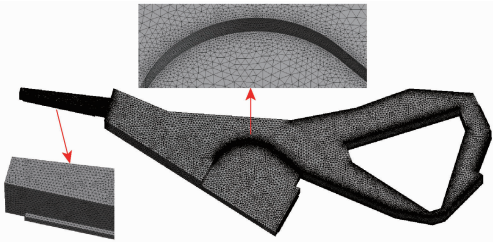


图3 残膜阻隔装置气流分配室网格划分

Fig.3 Grid division of airflow distribution chamber of residual film barrier device

1.3 气体控制方程

定义气流分配室内的空气流动为稳态黏性流动,由于分配室内流速较低,可视为气体不可压缩^[12],根据以上条件,气体流动状态满足质量守恒方程和动量守恒方程,即

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \mu_i) = s_m \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mu_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \mu_i \mu_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i \quad (2)$$

式中 ρ ——流体密度, kg/m³

μ_i, μ_j ——平均流速分量, m/s

p ——静压, Pa

x_i, x_j ——笛卡尔坐标系

τ_{ij} ——应力张量

g_i ——方向的重力体积力

F_i ——外部体积力

在对腔体内气流场仿真中使用标准模型。标准模型本身具有较高的稳定性和计算精度,通过求解湍流动能方程和湍流耗散率方程得到解析解,再利用解析解计算湍流粘度,最终通过 Boussinesq 假设得到雷诺应力的解^[13],控制方程为

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + G_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + G_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (4)$$

式中 G_k ——由平均速度梯度引起的湍动能 k 的产生项

G_b ——由浮力引起的湍动能 k 的产生项

Y_M ——可压缩湍流中的脉动扩张项

$C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}$ ——经验常数

$\sigma_k, \sigma_\varepsilon$ ——对应 k 和 ε 的 Prandtl 数

S_k, S_ε ——用户定义的源项

在标准 $k-\varepsilon$ 模型中根据 Launder 等的推荐值及试验验证,模型常数 $C_{1\varepsilon} = 1.44, C_{2\varepsilon} = 1.92, C_{3\varepsilon} = 0, \sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3$ 。对于不可压缩流体, $G_b = 0, Y_M = 0, S_k = 0$ 和 $S_\varepsilon = 0$ 。此时,标准模型分别为

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

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

1.4 边界条件

定义气流分配室气流入口为 inlet,气流出口为 outlet。进口条件采取“速度入口”边界条件,结合装置实际工作风速需求及残膜漂浮的最小速度将进口速度设为 4 m/s,根据雷诺数计算公式和湍流强度计算公式得出进口湍流参数。出口条件采用压力出口边界条件,并结合实际工况给定大气条件作为压力边界值。壁面条件采用无滑移壁面边界条件。

1.5 求解方法与评价指标

求解器采用 SIMPLE 算法,残差精度低于 10^{-3} 解视为收敛。为了定量评价射流出口处气流分布的均匀性程度,使用速度不均匀系数 M 对射流气幕的效果进行评价^[14],计算式为

$$M = \frac{\sigma_v}{\bar{V}_a} \times 100\% =$$

$$\frac{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (V_i - \bar{V}_a)^2}}{\bar{V}_a} \times 100\% \quad (7)$$

式中 σ_v ——速度标准偏差, m/s

\bar{V}_a ——速度均值, m/s

V_i ——各点速度, m/s n ——取点数量

2 响应面试验设计及分析

2.1 基于数值模拟的单因素试验

在装置外部结构受采棉机底板限制难以改变

时,射流出口参数优化设计对改善气流分配室内气流分布均匀性具有积极影响。选取射流出口 1、射流出口 2 的长度 X_1 、 X_2 作为影响因素,速度不均匀系数作为评价指标进行基于数值模拟的单因素试验,以缩小射流出口结构影响因素的取值范围、减小计算量。受装置自身尺寸限制及参考前人经验,设定射流出口 1 长度 X_1 的变化范围为 50 ~ 80 mm,射流出口 2 长度 X_2 的变化范围为 120 ~ 180 mm。

在入口速度为 4 m/s,射流出口 1 宽度为 3 mm,射流出口 2 长度为 150 mm,宽度为 3 mm 的条件下,分析不同参数下射流出口速度分布情况及速度不均匀系数 M 与射流出口 1 长度 X_1 之间的变化规律。沿射流出口 1 中轴线位置取 50 个点位提取速度绘制 Z 方向的速度曲线(图 4a),由图 4a 可以发现,当 X_1 发生变化时射流出口 1 速度分布较为均匀,起伏不大,较集中分布在 2 ~ 5 m/s,同时由图 4b 看出射流出口 2 速度起伏较大分布在 3 ~ 6 m/s,这表明 X_1 的变化对射流出口 2 速度均匀性有显著影响。据研究残膜最小悬浮速度为 0.8 m/s^[15],所有尺寸参数下各射流出口速度均可满足这一条件。速度不均匀系数 M 与射流出口 1 长度 X_1 之间的关系曲线如图 5 所示,由图 5 可知,速度不均匀系数 M_1 随着射流出口 1 长度的增加呈先降低后平稳再降低的变化规律,在 X_1 为 80 mm 时, M_1 最小, M_1 为 4.70% 时射流出口 1 出口处的速度较均匀;速度不均匀系数 M_2 随着射流出口 1 长度的增加呈先降低后增加再降低的

变化规律,在 X_1 为 80 mm 时, M_2 最小, M_2 为 7.74% 时射流出口 2 出口处的速度较均匀。考虑到各因素之间的耦合作用,取 X_1 有效取值范围为 70 ~ 80 mm。

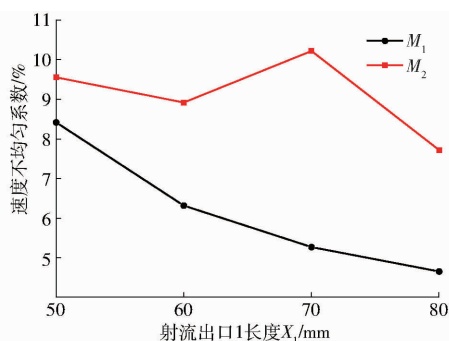
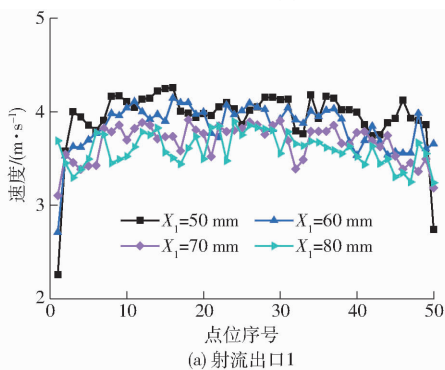


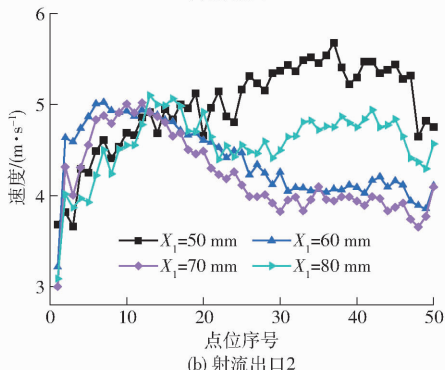
图 5 速度不均匀系数 M 与 X_1 关系曲线

Fig. 5 Relationship curves between M and X_1

在入口速度为 4 m/s、射流出口 1 长度为 80 mm、宽度为 3 mm、射流出口 2 宽度为 3 mm 的条件下,分析不同参数下射流出口 2 分别在 Z 方向上速度分布情况及速度不均匀系数 M 与射流出口 2 长度 X_2 之间的变化规律。沿射流出口 2 出口中轴线位置取 50 个点位提取速度绘制 Z 方向的速度曲线(图 6a)。由图 6a 可知,当 X_2 为 120 mm 时,射流出口 1 速度起伏最大,这是由射流出口尺寸较小时,分配室内存在较大涡流导致的,其他尺寸参数下出口速度集中分布在 3 ~ 4 m/s 的范围。同时由图 6b 看出射流出口 2 速度起伏较大分布在 2 ~ 5 m/s,这表明 X_2 的变化对射流出口 2 速度均匀性有着显著影响。速度不均匀系数 M 与射流出口 2 长度 X_2 之间



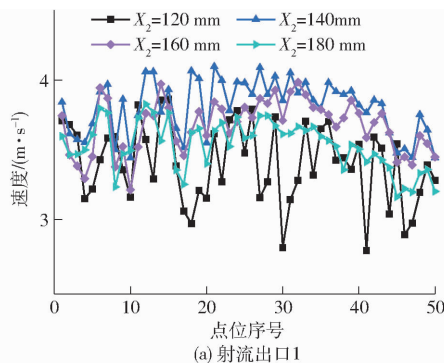
(a) 射流出口 1



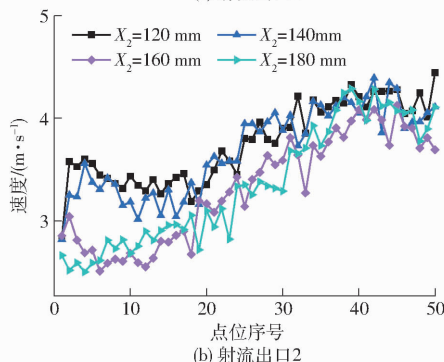
(b) 射流出口 2

图 4 速度分布曲线

Fig. 4 Velocity distribution curves



(a) 射流出口 1



(b) 射流出口 2

图 6 速度分布曲线

Fig. 6 Velocity distribution curves

的关系曲线如图7所示,由图7可知,速度不均匀系数 M_1 随着射流出口2长度的增加而增加,在 X_2 为 160 mm 时, M_1 最小, M_1 为 4.20% 时射流出口1出口处的速度较均匀,速度不均匀系数 M_2 随着射流出口2长度的增加而减小,在 X_2 为 120 mm 时, M_2 最小, M_2 为 10.22% 时射流出口2出口处的速度较均匀。考虑到各因素之间的耦合作用,取 X_2 有效取值范围为 140 ~ 160 mm。

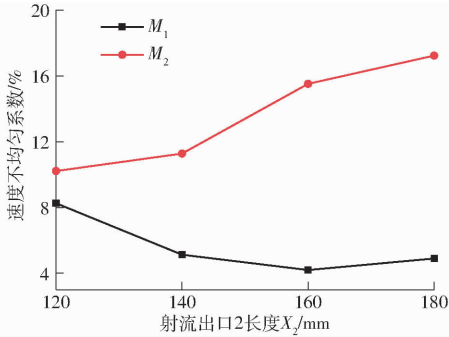


图7 速度不均匀系数 M 与 X_2 关系曲线

Fig. 7 Relationship curves between M_2 and X_2

由图5和图7可以发现,射流出口1与射流出口2速度不均匀系数 M_1 、 M_2 两个目标在总体上彼此冲突,在一个问题上存在多个目标,故需使用多目标优化的方法对装置结构参数进行优化设计。

2.2 气流分配室代理模型建立

为了综合考虑4个设计变量之间的耦合关系及对目标参数的交互作用^[16-17],根据优化软件 Design-Expert 12 中的 Box-Behnken Design 的试验方法,选取出风口射流出口长度、射流出口宽度为输入变量,引入射流出口空气流速的速度不均匀系数作为气体均匀性的评价指标建立四因素三水平的实验设计方案,试验因素与编码见表2,试验设计与结果见表3。

表2 试验因素与编码

Tab. 2 Test factors and coding

编码	因素			
	射流出口1 长度 X_1 /mm	射流出口2 长度 X_2 /mm	射流出口1 宽度 Y_1 /mm	射流出口2 宽度 Y_2 /mm
-1	70	140	2	2
0	75	150	3	3
1	80	160	4	4

对表3中的输入量和响应值进行二次多项式拟合,分别建立以射流出口速度不均匀系数 M_1 、 M_2 为目标函数的响应模型为

$$M_1 = -128.00435 + 0.508960X_1 + 1.9684X_2 + 5.97179Y_1 + 10.41622Y_2 + 0.004396X_1X_2 + 0.070510X_1Y_1 - 0.020605X_1Y_2 - 0.033745X_2Y_1 - 0.021215X_2Y_2 - 0.4247Y_1Y_2 - 0.008405X_1^2 - 0.004574X_2^2 - 0.825004Y_1^2 - 0.807492Y_2^2 \quad (8)$$

表3 试验设计与结果

Tab. 3 Test design and results

序号	因素				射流出口 1 速度不 均匀系数 M_1 /%	射流出口 2 速度不 均匀系数 M_2 /%
	射流 出口1 长度	射流 出口2 长度	射流 出口1 宽度	射流 出口2 宽度		
	X_1 /mm	X_2 /mm	Y_1 /mm	Y_2 /mm		
1	70	140	3	3	5.7106	6.0229
2	80	140	3	3	5.4352	8.8511
3	70	160	3	3	5.2012	7.2548
4	80	160	3	3	5.8050	12.0261
5	75	150	2	2	4.5384	7.5955
6	75	150	4	2	5.7971	14.1014
7	75	150	2	4	4.1984	10.6227
8	75	150	4	4	3.7583	19.6611
9	70	150	3	2	4.9214	8.5279
10	80	150	3	2	5.3736	7.1642
11	70	150	3	4	4.5672	11.5957
12	80	150	3	4	4.6073	13.8317
13	75	140	2	3	4.7826	5.1868
14	75	160	2	3	5.0901	10.7823
15	75	140	4	3	4.7899	11.1369
16	75	160	4	3	3.7476	14.3823
17	70	150	2	3	4.8096	8.4282
18	80	150	2	3	5.4154	13.2794
19	70	150	4	3	4.2078	13.7455
20	80	150	4	3	6.2238	16.6361
21	75	140	3	2	5.2390	7.6410
22	75	160	3	2	5.4628	7.6665
23	75	140	3	4	4.8302	10.3542
24	75	160	3	4	4.2054	14.2311
25	75	150	3	3	6.0903	14.976
26	75	150	3	3	6.1837	14.8415
27	75	150	3	3	6.0462	14.9492
28	75	150	3	3	6.0766	14.9163
29	75	150	3	3	6.0862	14.847

$$M_2 = -1314.0418 + 12.94369X_1 + 10.92533X_2 + 17.81048Y_1 - 17.3864Y_2 + 0.09715X_1X_2 - 0.09803X_1Y_1 + 0.179985X_1Y_2 - 0.058752X_2Y_1 + 0.096285X_2Y_2 + 0.63313Y_1Y_2 - 0.095844X_1^2 - 0.038746X_2^2 - 0.121738Y_1^2 - 1.69243Y_2^2 \quad (9)$$

采用方差分析(ANOVA)统计分析技术检验响应面近似模型的适用性。为了对回归模型精度进行定量评估,以决定系数 R^2 来评估数学模型的拟合效果^[18]。

二阶多项式响应面模型对射流出口速度不均匀系数 M_1 、 M_2 的拟合优度如图8所示。从图8可看出,射流出口速度不均匀系数 M_1 、 M_2 的决定系数分别为 0.8540、0.9341,均大于 0.85,可见模型的拟合精度满足要求。

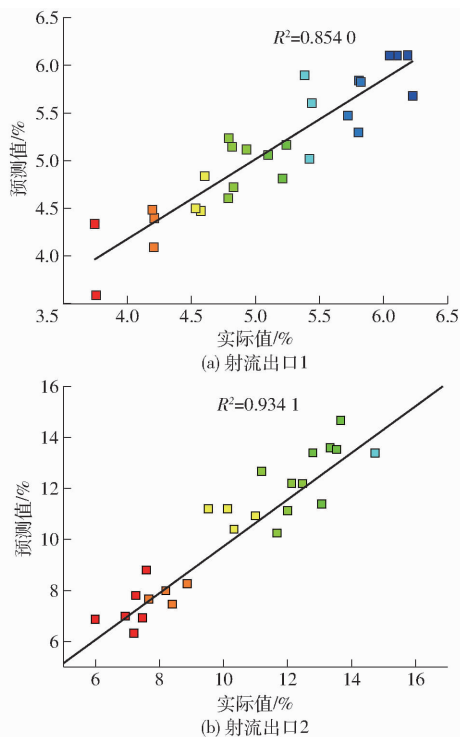


图 8 拟合优度

Fig. 8 Goodness of fit

为了进一步验证预测模型的准确性,在影响因素取值范围中随机取 5 组不同于表 3 的结构参数组合进行试验,试验参数取值如表 4 所示。建立表 4 中各结构参数相对应的三维模型并对其进行数学模型求解及数值模拟求解,可得出不同附加试验组的模型预测值与数值模拟实际值对比情况^[19]如图 9

表 4 附加试验结构参数

Tab. 4 Structural parameters of additional tests

序号	因素			
	射流出口 1	射流出口 2	射流出口 1	射流出口 2
	长度 X_1 /mm	长度 X_2 /mm	宽度 Y_1 /mm	宽度 Y_2 /mm
1	70	160	3	2
2	75	155	3	3
3	70	145	3	4
4	80	160	2	3
5	75	140	2	2

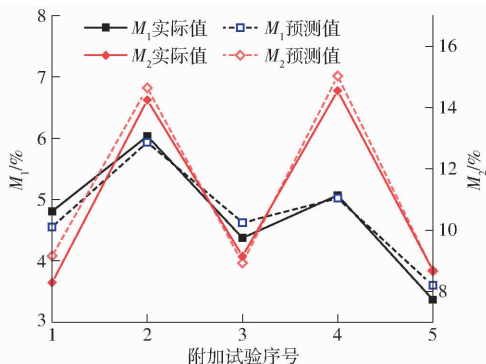


图 9 模型预测值与数值模拟实际值对比

Fig. 9 Comparison between predicted value of model and actual value of numerical simulation

所示。由图 9 可知, M_1 、 M_2 预测值与数值模拟实际值具有相同的变化趋势, M_1 、 M_2 预测值与数值模拟实际值之间的平均相对误差分别为 5% 和 10%, 模拟值与实际值之间的吻合度较高, 认为该模型基本符合要求, 可用来预测实际状况下射流出口的速度均匀性状态。

3 NSGA - II 优化及验证

在气流分配室设计中, 为了获得较小 M_1 、 M_2 , 建立残膜阻隔装置多目标优化数学模型为

$$\begin{cases} \min F(x) = (M_1, M_2) \\ \text{s. t.} \begin{cases} 70 \text{ mm} \leq X_1 \leq 80 \text{ mm} \\ 140 \text{ mm} \leq X_2 \leq 160 \text{ mm} \\ 2 \text{ mm} \leq Y_1 \leq 4 \text{ mm} \\ 2 \text{ mm} \leq Y_2 \leq 4 \text{ mm} \end{cases} \end{cases} \quad (10)$$

为了找出目标变量之间的最佳参数组合, 采用 NSGA - II 遗传算法^[20]对数学模型进行优化。NSGA - II 算法是一种基于 NSGA 的改进多目标遗传算法, 相较于其他优化算法, NSGA - II 算法可有效地提高优化精度, 降低计算复杂程度, 避免优化过程中产生局部收敛, 被广泛用来求解多目标优化问题的 Pareto 最优解^[21]。设定决策变量为 X_1 (射流出口 1 长度)、 X_2 (射流出口 2 长度)、 Y_1 (射流出口 1 宽度)、 Y_2 (射流出口 2 宽度), 种群大小为 50, 迭代次数为 200, 目标个体数量为 2, NSGA - II 算法流程图如图 10 所示。根据真实试验产生初始种群, 差分进化产生子代, 再进行非支配排序和拥挤距离选择下一代的父代^[22], 最终得到 Pareto 最优解, 在一个问题上存在多个目标时, 原则上会存在一组最优解

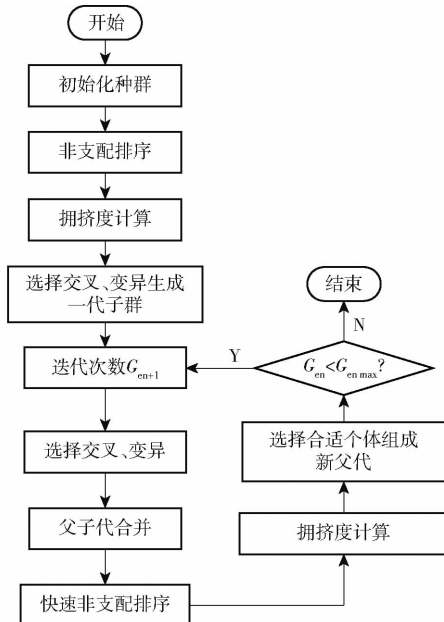


图 10 NSGA - II 算法流程图

Fig. 10 Flowchart of NSGA - II algorithm

(通常称为帕累托最优解)^[23]而不是单一的最优解。多目标优化帕累托解集如表5所示,Pareto 前沿面结果如图11所示。

表5 多目标优化帕累托解集

Tab.5 Set of multi-objective optimization Pareto solution

序号	因素				射流出口 1 速度不 均匀系数 $M_1/\%$	射流出口 2 速度不 均匀系数 $M_2/\%$
	射流	射流	射流	射流		
	出口 1	出口 2	出口 1	出口 2		
	长度	长度	宽度	宽度		
	X_1/mm	X_2/mm	Y_1/mm	Y_2/mm		
1	70	160	4	4	1.509 5	12.111 5
2	70	160	3.8	4	2.034 6	11.485 4
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
47	80	140	2	2	3.206 0	6.730 0
48	70	140	2	2	3.571 0	5.819 2
49	70	160	2	2	4.190 0	5.427 5
50	70	160	3	4	3.213 9	9.548 6

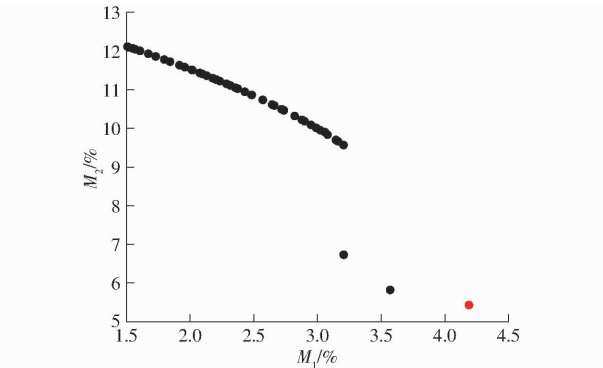


图11 Pareto 前沿面结果

Fig.11 Pareto-optimal front searched result graph

由表5和图11可知,随着 M_1 增大, M_2 减小。根据实际条件及加工的可操作性和可行性,选取第49组解(图11红色点)作为最优解并对其进行归整化处理,即当设计参数为 $X_1 = 70 \text{ mm}$ 、 $X_2 = 160 \text{ mm}$ 、 $Y_1 = 2 \text{ mm}$ 、 $Y_2 = 2 \text{ mm}$ 时,帕累托解优化效果最好,此时优化目标 M_1 为4.19%、 M_2 为5.4275%。

利用仿真模型对其检验,仿真值与优化预测结果的相对误差不大于8.2%(表6),表明基于多目标遗传算法的目标变量预测值与数值计算的目标变量结果误差较小,优化结果可靠。表7为最优结构参数,优化后模型的 M 值均优于初始模型, M_1 、 M_2 分别减小28.6%和25.9%。

表6 响应面模型精度验证

Tab.6 Accuracy verification of response surface model

帕累托解	预测值	仿真值	相对误差/%
M_1	4.190 0	4.565 3	8.2
M_2	5.427 5	5.477 2	0.9

表7 最优结构参数

Tab.7 Optimal structural parameters

帕累托解	X_1/mm	X_2/mm	Y_1/mm	Y_2/mm	$M_1/\%$	$M_2/\%$
初始	80	120	3	3	6.389 1	7.389 1
优化	70	160	2	2	4.190 0	5.427 5

气流场三维截面选取示意图如图12所示,在气流分配室内部空间分别以两种方向来选取截面,以显示速度场空间分布情况^[24]。截面a与气流分配室底面垂直,距离射流出口1为26 mm;截面b与气流分配室地面平行,且距地面35 mm。

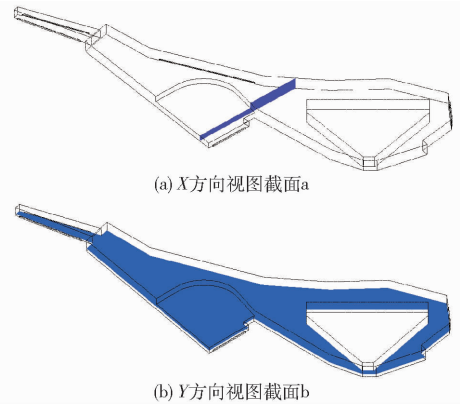


图12 气流场三维截面选取示意图

Fig.12 Three sections selected in airflow 3D field

图13为在截面a处优化前后的速度分布云图。由图13可见,原始模型内沿水平方向右侧区域速度梯度较大,最大速度可达到6.216 m/s,最小速度仅有0.777 m/s,局部速度分布不均匀。经优化后,速度梯度减小,气流分配室内流体的流动特性有所改善。由图14a可知,流体在出口与两股气流汇集处由于流道的突然改变,速度降低,出现3处规模较大涡流,射流出口处速度梯度大,气流分布不均匀。经优化后(图14b),模型涡流规模、数量均明显改善,射流出口速度较原始模型略有下降,但速度均匀性增强且当前速度仍可达到实现阻隔残膜的目的。综上所述,经优化后装置的性能得到较好改善。

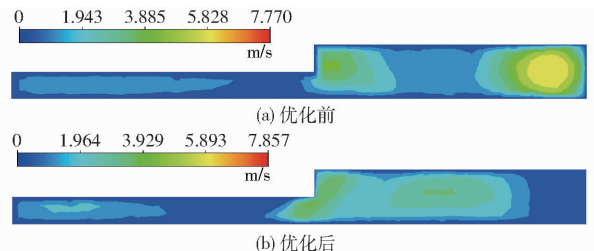


图13 截面a速度分布云图

Fig.13 Velocity distribution nephogram of section a

4 试验验证

为验证气流分配室仿真模拟的可靠性,设计了

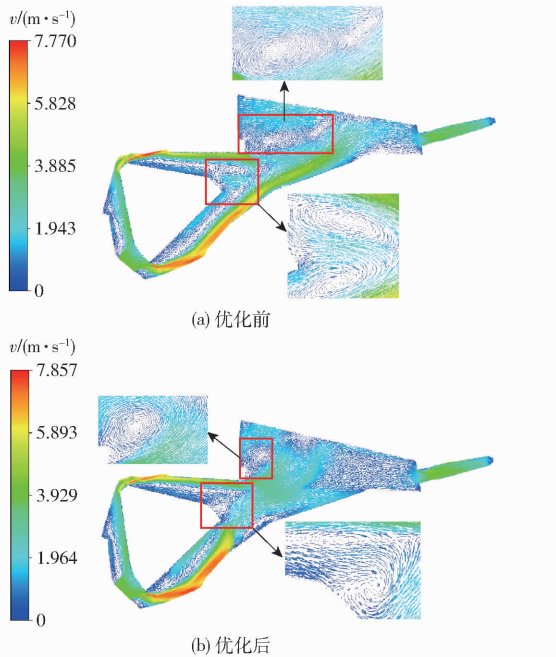


图 14 截面 b 速度矢量图

Fig. 14 Velocity vector diagrams of section b

气流分配室的实体装置, 验证试验于 2022 年 4 月 30 日在石河子大学机械电气工程学院小工厂进行, 采用的试验设备包括 550 W 离心风机、台达 MS300 型变频器、残膜阻隔装置、希玛热敏式风速风量计。试验装置如图 15 所示。

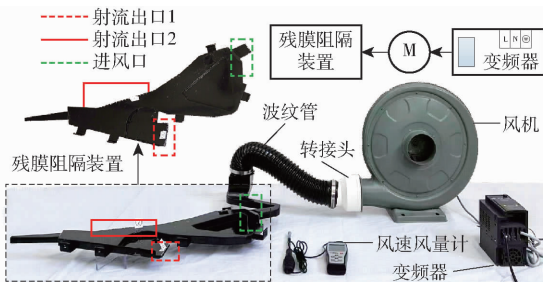


图 15 试验装置图

Fig. 15 Test device diagram

试验中首先调节变频器, 将气流分配室入口风速稳定在 4 m/s, 随后在各射流出口中线位置均匀取 15 个点并测量其风速, 每个测量点停留 5 s, 取最大值作为最终测量结果。最后将出口风速的测量结果与仿真结果进行对比。

射流出口速度试验值与仿真值对比如图 16 所

示, 由于气流经引风部件后在气流分配室入口处分布不均匀, 在入口处损失部分能量导致试验值低于仿真值, 两射流出口最大速度偏差分别为 8.3% 和 14%, 但是总体变化趋势一致。

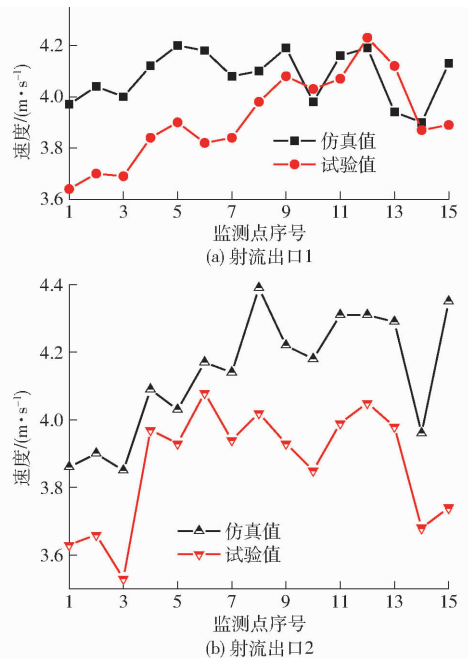


图 16 速度仿真与实测值对比

Fig. 16 Comparison of velocity simulation and measured value

5 结论

(1) 基于二阶响应面法、NSGA-Ⅱ法对气流分配室射流出口参数进行优化设计, 以速度不均匀系数为响应值, 建立以射流出口速度不均匀系数为目标函数的响应模型。

(2) 得出合理优化设计参数组合为 $X_1 = 70 \text{ mm}$ 、 $X_2 = 160 \text{ mm}$ 、 $Y_1 = 2 \text{ mm}$ 、 $Y_2 = 2 \text{ mm}$, 此时优化目标 $M_1 = 4.19\%$ 、 $M_2 = 5.4275\%$; 与初始模型相比, 优化后模型 M 均优于初始模型, M_1 、 M_2 分别减小 28.6% 和 25.9%。

(3) 装置加工试制进行试验, 试验结果表明试验值与仿真值数据趋势吻合, 两者最大速度偏差分别为 8.3% 和 14%, 表明该模型可用来模拟射流出口处速度分布情况。

参 考 文 献

- [1] 代建武, 肖红伟, 白峻文, 等. 气体射流冲击干燥机气流分配室流场模拟与结构优化[J]. 农业工程学报, 2013, 29(3): 69-76. DAI Jianwu, XIAO Hongwei, BAI Junwen, et al. Numerical simulation and optimum design on airflow distribution chamber of airimpingement jet dryer[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(3): 69-76. (in Chinese)
- [2] 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 for rice seeding-growing tray[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 94-101. (in Chinese)
- [3] 吴敏, 段豪, 王振文, 等. 基于温湿度控制的红外热风联合干燥机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊 1): 483-492.

- WU Min, DUAN Hao, WANG Zhenwen, et al. Design and experiment of infrared-hot air combined dryer based on temperature and humidity control[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51 (Supp. 1): 483 - 492. (in Chinese)
- [4] 于海明,李海源,汪春,等. 秧盘干燥机气流分配室流场均匀性仿真分析[J]. 农机化研究, 2020, 42(2): 15 - 21.
YU Haiming, LI Haiyuan, WANG Chun, et al. Simulation analysis of flow field uniformity in air distribution room of rice seedbed microwave hot air coupling dryer[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(2): 15 - 21. (in Chinese)
- [5] CHENG Haiying, ZHAO Ning, LI Jianxin, et al. Integrated design method for a multi-objective and multi-parameter cavity structure under the flow field effect[J]. Journal of the Chinese Institute of Engineers, 2020, 43(8): 752 - 762.
- [6] LI H, HU Y, QI L, et al. Simulation optimization and experimental study of the air distribution chamber structure of straw-based nutrient seeding-growing bowl tray microwave-hot-air coupling dryers [J]. Engenharia Agricola, 2022, 42 (2): e20210226.
- [7] 彭震. 采棉机采摘头气幕式残膜阻隔装置的设计研究[D]. 石河子:石河子大学, 2020.
PENG Zhen. Design and research of air curtain residual film barrier device for cotton picking head [D]. Shihezi: Shihezi University, 2020. (in Chinese)
- [8] 孔德海,陈少秋,刘存良,等. 微小狭缝肋矩形通道多目标优化研究[J]. 航空动力学报: 1 - 15 [2022 - 04 - 22].
- [9] CHENG H, ZHAO N, LI J, et al. Integrated design method for a multi-objective and multi-parameter cavity structure under the flow field effect[J]. Journal of the Chinese Institute of Engineers, 2020, 43(8): 752 - 762.
- [10] CHEN Yue, LÜ Lin. The multi-objective optimization of combustion chamber of DI diesel engine by NLPQL algorithm[J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 73(1): 1332 - 1339.
- [11] ZHANG Tiantian, HUANG Wei, WANG Zhenguo, et al. A study of airfoil parameterization, modeling, and optimization based on the computational fluid dynamics method[J]. Journal of Zhejiang University-Science A (Applied Physics & Engineering), 2016, 17(8): 632 - 645.
- [12] 刘嫣红,李梦佳,艾子平,等. 倾斜料盘式气体射流冲击干燥机优化设计及试验验证[J]. 农业工程学报, 2022, 38(5): 269 - 278.
LIU Yanhong, LI Mengjia, AI Ziping, et al. Optimal design and experimental verification of tilted tray air-impingement dryers [J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(5): 269 - 278. (in Chinese)
- [13] 石保同,张希斌,黄文锋. 基于标准 $k - \varepsilon$ 模型的平衡大气边界层研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2019, 42(8): 1106 - 1113.
SHI Baotong, ZHANG Xibin, HUANG Wenfeng. Equilibrium atmospheric boundary layer simulation based on standard $k - \varepsilon$ model[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2019, 42(8): 1106 - 1113. (in Chinese)
- [14] 陈忠加,雷雯雯,王青春. 基于温度和速度均匀性的侧送风烘房设计及仿真[J]. 农业工程学报, 2021, 37(19): 18 - 26.
CHEN Zhongjia, LEI Wenwen, WANG Qingchun. Design and simulation of side air supply drying room based on temperature and velocity homogeneity[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(19): 18 - 26. (in Chinese)
- [15] 张若宇,坎朵,郭文松,等. 机采籽棉残膜分离机籽棉带出机理仿真[J]. 农业工程学报, 2012, 28(1): 17 - 21.
ZHANG Ruoyu, KAN Za, GUO Wensong, et al. Simulation on cotton dragout mechanism of mesh roller-type cotton and film remnant separator[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(1): 17 - 21. (in Chinese)
- [16] 崔宝珍,孔维娜,马恺. 多项式响应面代理模型在立柱结构优化中的应用[J]. 机械设计, 2017, 34(4): 44 - 48.
CUI Baozhen, KONG Weina, MA Kai. Application of polynomial response surface surrogate model in the large column structure optimization[J]. Journal of Machine Design, 2017, 34(4): 44 - 48. (in Chinese)
- [17] 魏然,王显会,周云波,等. 帕累托最优在车辆底部防护结构设计中的应用研究[J]. 兵工学报, 2015, 36(6): 1061 - 1066.
WEI Ran, WANG Xianhui, ZHOU Yunbo, et al. Application of Pareto optimality in protective structure design of vehicle underbody[J]. Acta Armamentarii, 2015, 36(6): 1061 - 1066. (in Chinese)
- [18] 杨风波,薛新宇,蔡晨,等. 航空专用离心喷头雾化性能试验与影响因子研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(9): 96 - 104.
YANG Fengbo, XUE Xinyu, CAI Chen, et al. Atomization performance test and influence factors of aviation special centrifugal nozzle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9): 96 - 104. (in Chinese)
- [19] 邢雷,李金煜,赵立新,等. 基于响应面法的井下旋流分离器结构优化[J]. 中国机械工程, 2021, 32(15): 1818 - 1826.
XING Lei, LI Jinyu, ZHAO Lixin, et al. Structural optimization of downhole hydrocyclones based on response [J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(15): 1818 - 1826. (in Chinese)
- [20] 张富毅,吴钦,赵晓阳,等. 基于响应面方法的喷水推进器进水流道多目标优化[J]. 兵工学报, 2020, 41(10): 2071 - 2080.
ZHANG Fuyi, WU Qin, ZHAO Xiaoyang, et al. Multi-objective optimization of water-jet propulsion inlet duct based on response surface method[J]. Acta Armamentarii, 2020, 41(10): 2071 - 2080. (in Chinese)
- [21] 杨红波,史文库,陈志勇,等. 基于 NSGA - II 的斜齿轮宏观参数多目标优化[J]. 吉林大学学报(工学版): 1 - 12 [2022 - 04 - 24].
- [22] 云浩程,于繁华,程杜,等. NSGA - II 遗传算法结合响应面法优化桦褐孔菌活性成分提取工艺[J]. 食品工业科技, 2022, 43(17): 185 - 193.
- [23] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA - II [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182 - 197.
- [24] 吕晓兰,张美娜,常有宏,等. 果园风送喷雾机导流板角度对气流场三维分布的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(15): 81 - 87.