

武夷岩茶摇青机离心风机优化设计与试验

阮承治^{1,2} 陶齐齐¹ 陈奕玮¹ 郭波^{1,2} 邱昌东^{1,2} 陈加友³ 杨君^{1,2}

(1. 武夷学院机电工程学院, 武夷山 354300;

2. 武夷学院农机智能控制与制造技术福建省高校重点实验室, 武夷山 354300;

3. 黎明职业大学智能制造工程学院, 泉州 362000)

摘要: 为提升武夷岩茶摇青机用离心风机性能,通过多目标遗传算法对离心风机叶轮进行优化设计与试验验证。首先,针对38组设计样本,采用拉丁超立方设计方法对叶轮叶片数量、叶轮内外径比、叶片进口安装角、叶片出口安装角、叶片折弯半径和叶片进口直径进行优化;然后通过NSGA-II多目标算法对构建的最小二乘回归(Least squares regression, LSR)与移动最小二乘法(Moving least square method, MLSM)响应面模型进行求解,得到风机风量与风机效率最优时的Pareto解集,并进行Spearman变量相关性分析;最后通过CFD数值仿真与试验,验证了优化设计方法对实际设备摇青效果提升的有效性。结果表明:叶片进口安装角和出口安装角对风机风量影响最大,叶轮内外径比和叶片出口安装角对风机效率的影响最大,达到高相关程度;最优参数组合为叶片数量19、叶轮内外径比0.67、叶片进口安装角73.86°、叶片出口安装角128.74°、折弯半径25.28 mm、叶片进口直径24.95 mm;相较于原型风机,优化后风机风量增加381.22 m³/h,风机效率提高4.33个百分点,叶梗、叶片平均走水分别提高2.05、3.15个百分点,做茶感官审评平均得分91.4,验证了风机优化设计对整机茶叶摇青品质的提升。

关键词: 武夷岩茶摇青机; 离心风机; 叶轮; 优化设计; 试验

中图分类号: S24; TP23

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)12-0480-11

OSID:



Optimization Design and Experimental Validation of Centrifugal Fan for Wuyi Rock Tea Shaking Machine

RUAN Chengzhi^{1,2} TAO Qiqi¹ CHEN Yiwei¹ GUO Bo^{1,2} QIU Changdong^{1,2} CHEN Jiayou³ YANG Jun^{1,2}

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Wuyi University, Wuyishan 354300, China

2. Key Laboratory for Agricultural Machinery Intelligent Control and Manufacturing of Fujian Education Institutions, Wuyi University, Wuyishan 354300, China

3. College of Intelligent Manufacturing Engineering, Liming Vocational University, Quanzhou 362000, China)

Abstract: In order to improve the performance of centrifugal fan for Wuyi rock tea shaking machine, the centrifugal fan impeller was optimally designed and experimentally verified by multi-objective genetic algorithm. Firstly, for the 38 groups of design samples, the Latin hypercube design method was used to optimize the number of impeller blades, the inner and outer diameter ratio of the impeller, the inlet mounting angle of the blades, the outlet mounting angle of the blades, the bending radius of the blades, and the inlet diameter of the blades. Then, the constructed least squares regression (LSR) and moving least square method (MLSM) response surface models were solved using the NSGA-II multi-objective genetic algorithm, the Pareto solution set for the optimal relationship between fan airflow and fan efficiency can be obtained, and Spearman variable correlation analysis can be conducted. Finally, the effectiveness of the optimized design method in improving the shaking effectiveness of the actual equipment was verified through CFD numerical simulation and experiments. The results showed that the blade inlet mounting angle and outlet mounting angle had the greatest effects on the fan airflow, the impeller inner and outer diameter ratios and the blade outlet mounting angle had the greatest effects on the

收稿日期: 2024-08-22 修回日期: 2024-09-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(61903288)、福建省科技创新平台项目(2022-p-029)、福建省自然科学基金项目(2022J011191)、福建省本科高校教育教学改革项目(FBJY20230282、FBJG20210049)和武夷学院教改项目(KC202228RZ)

作者简介: 阮承治(1984—),男,副教授,博士,主要从事智能控制和农业机械研究,E-mail: ruanczhi@163.com

efficiency of fan, reaching a high degree of correlation. The optimal parameter combinations were as follows: the number of blades was 19, the ratio of the inner and outer diameters of the impeller was 0.67, the installation angle of the blade inlet was 73.86° , the installation angle of the blade outlet was 128.74° , the bending radius was 25.28 mm and the blade inlet diameter was 24.95 mm. Compared with the prototype fan, the optimized fan air volume was increased by $381.22\text{ m}^3/\text{h}$, the efficiency of fan was increased by 4.33 percentage points, the average water loss of the stem and leaves increased by 2.05 and 3.15 percentage points, respectively, and the average score of the sensory review of the tea was 91.4 points, which verified that the optimized design of the fan improved the quality of the whole machine for tea shaking.

Key words: Wuyi rock tea shaking machine; centrifugal fan; impeller; optimized design; experiment

0 引言

福建省是我国重要产茶区,生产的武夷岩茶加工工序复杂,以特有的“岩韵”品质而闻名。其中,摇青工序是影响武夷岩茶色、香、味品质的关键,通过摇动茶青并配合热风,使得茶青碰撞、边缘破损,达到“绿叶红镶边”效果,同时激发茶叶内酶促反应并释放香气,制成的茶叶口感醇厚、茶香浓郁^[1-2]。传统人工摇青力度不均、效率低且成本高,不利于茶青走水与滋味形成,严重影响武夷岩茶生产和质量^[3],而茶叶摇青机的出现^[4],使武夷岩茶摇青工序中释放生产力成为可能。离心风机作为茶叶摇青机核心供风部件,通过旋转做功并配合炭炉供热,将热风送入桶内,增强茶叶呼吸作用,为茶叶呼吸代谢等一系列化学反应提供氧气,促进茶叶内部化学物质相互转化,进一步促进茶叶走水萎凋,形成香气与滋味。然而现有武夷岩茶摇青机用离心风机设计依赖人工经验,存在风机风量不足、效率低等问题,导致摇青过程中茶叶呼吸作用不强,做茶品质不佳、设备能耗高等,无法满足武夷岩茶摇青工序要求。

王秀萍等^[5-6]探究了乌龙茶做青过程中呼吸作用的重要性,通过对比试验得知,通恒风做青时茶叶呼吸作用更强,形成香气、滋味最优。陈霓等^[7]通过二次旋转正交组合与多目标优化对半喂入联合收获机双圆锥离心式清选风机进行优化,谷物脱粒效果优于原型装置。王维等^[8]探究了4种弧盘叶轮对离心通风机性能的影响,得到了风机高比转速下最优叶轮前盘型线。CHAI等^[9]结合CFD与响应面法对脱粒稻谷清选风机进行优化,得出最优清选性能时叶片进口安装角与叶片曲率最优值。以上对茶叶加工过程通风要求以及农业机械风机结构优化进行了研究,但是针对武夷岩茶摇青机用离心风机性能优化及对制茶摇青效果改善的研究却未见报道^[10-11]。

针对武夷岩茶摇青机用离心风机风量不足、效率低问题,本研究开展叶片优化设计与试验验证。

将NSGA-Ⅱ优化算法与响应面模型优化方法相结合,研究叶轮叶片数量、叶轮内外径比、叶片进口安装角、叶片出口安装角、叶片折弯半径和叶片进口直径对离心风机风量与效率的影响,结合CFD数值仿真,分析优化前后离心风机作业性能以及摇青机实际摇青效果改善机理,并以武夷岩茶中主要品类武夷水仙为例试验验证摇青效果,为武夷岩茶摇青装置参数优化设计与性能提升提供参考。

1 武夷岩茶摇青机与离心风机结构

武夷岩茶摇青机结构如图1所示,全机主要由带轮、摇青桶、送风管、滚轮组件、支架、动力驱动组件和离心风机等组成,其中桶身全长3.0 m,直径1.1 m,桶内容积达 2.85 m^3 。外接炭炉与离心风机进风口相通产生热风,热风通过连接套进入通风管,与茶叶充分接触。驱动电机通过传动装置以及滚动驱动组件,带动摇青桶旋转以及桶内茶青充分碰撞,同时配合热风促进茶青走水萎凋、释放香气。

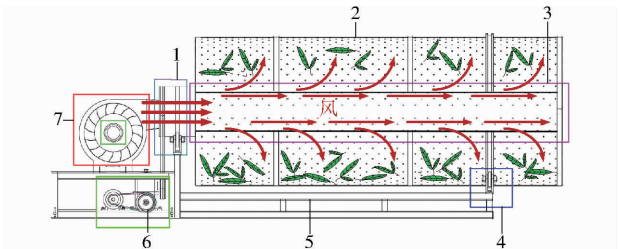


图1 武夷岩茶摇青机结构图
Fig.1 Structure diagram of shaking machine for Wuyi rock tea

1.带轮 2.摇青桶 3.送风管 4.滚轮组件 5.支架 6.动力驱动组件 7.离心风机

离心风机作为武夷岩茶摇青机的核心供风部件,其性能是提高摇青效率和茶叶品质的关键。本研究以离心风机作为研究对象,其主要由叶轮、蜗壳以及集流器组成,叶轮通过法兰盘固连在旋转轴上,进而与电动机相连,其中作为旋转部件的叶轮是影响风机气动性能的关键。离心风机结构和叶轮参数如图2和表1所示。

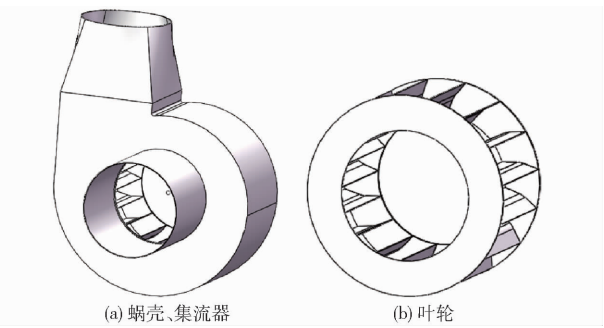


图 2 离心风机结构图
Fig. 2 Centrifugal fan structure diagrams

表 1 叶轮主要结构参数

参数	数值
叶片数 Z	16
叶轮内外径比 D_1/D_2	0.65
叶片进口安装角 $\beta_1/(\circ)$	73.56
叶片出口安装角 $\beta_2/(\circ)$	116.76
折弯半径 R/mm	40
叶片进口直径 L/mm	31.03

2 数值计算与多目标优化方法

2.1 数值模型网格划分与无关性验证

采用 Solidworks 2022 软件对离心风机进行建模与处理,将整体划分为蜗壳域与叶轮域,在不改变蜗壳外观、结构和大小的情况下,为了更好模拟武夷岩茶摇青机用离心风机的出风工况,在数值计算过程中对风机的进风段和出风段进行适当延伸^[12-14]。考虑到非结构化网格的高度适应性及网格划分的灵活性,采用 Fluent Meshing 软件对离心风机计算域模型进行非结构化网格划分。为满足湍流模型与近壁面函数对划分网格品质要求,对蜗壳固体壁面与叶片前后缘添加边界层,使得近壁面处第 1 层网格 y^+ 为 30 ~ 100^[15]。离心风机计算域模型与网格划分如图 3 所示。

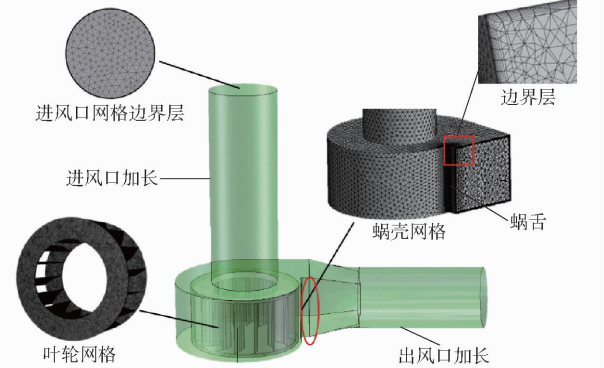


图 3 离心风机流体域与各区域网格
Fig. 3 Computational domain with grid for each region of centrifugal fan

以风机风量 Q 与风机效率 η 作为验证目标,对原型风机计算域进行网格无关性验证,结果如图 4 所示,从图 4 中可以看出,当整体计算域网格数为 4.49×10^6 ,风量波动与效率误差分别在 0.24%、0.26% 内,满足计算精度要求。

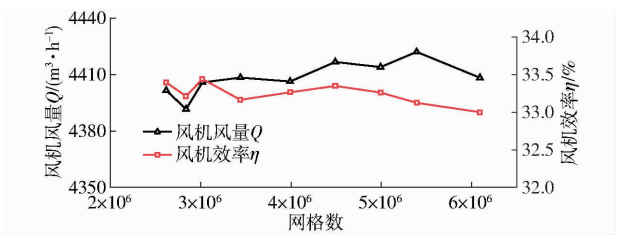


图 4 网格无关性验证
Fig. 4 Grid independence test

2.2 数值计算方法

采用 ANSYS Fluent 2022 R1 对多参考系模型 (MRF)原型离心风机进行数值计算。定常流场计算中,控制方程为三维平均 Navier - Stokes 方程^[16-17],湍流模型采用 Standard $k - \epsilon$ 模型^[18-19],近壁面处理采用标准壁面函数,将叶轮区旋转域定义为运动参考系,采用 Frame Motion 模型,其他区域为静止区域,动静交界面通过 interface 交接,设置额定工况旋转速度为 1 420 r/min,进出口均给定压力边界条件,进口总压设置为 0 Pa,出口表面压力设置为 0 Pa。压力速度耦合采用 SIMPLE 算法^[20]。流动控制方程的数值离散中,控制方程的动量方程和湍流耗散方程均采用 Second Order Upwind 离散格式,压力差值修正采用 PRESTO! 格式。流体运动连续方程中 3 个方向速度分量以及计算中的 k, ϵ 的收敛残差均设为 10^{-5} 。设置迭代次数为 1 000,通过监测叶轮力矩、出风口质量流与总压波动情况判断是否达到计算收敛。

2.3 响应面多目标优化

2.3.1 叶片外形参数化与试验设计

等厚叶片气动性能主要由其叶片型线决定,叶间流道形状符合气流在离心风机内的流动特性。在保持蜗壳与叶片厚度 ($t = 1.5 \text{ mm}$) 不变和叶片型线平滑的前提下,确定叶片数量 $Z(A)$ 、叶轮内外径比 $D_1/D_2(B)$ 、叶片进口安装角 $\beta_1(C)$ 、叶片出口安装角 $\beta_2(D)$ 、折弯半径 $R(E)$ 以及叶片进口直径 $L(F)$ 作为影响因素,叶片型线几何参数如图 5 所示。

根据实际模型设计经验,选取 6 个设计变量取值范围,具体见表 2。

以风机风量 Q 与风机效率 η 作为目标参数进行离心风机的多目标优化^[21-22],以筛选出最佳的设计参数,研究单圆弧叶片型线各参数对气动性能的

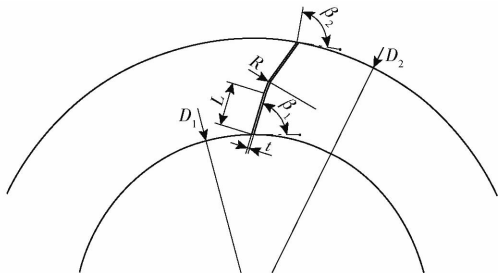


图 5 叶片型线相关设计参数示意图

Fig. 5 Schematic of geometric parameterization of arc in blade

表 2 优化设计变量

Tab. 2 Optimization design variables

变量	Z	D ₁ /D ₂	β ₁ /(°)	β ₂ /(°)	R/mm	L/mm
上限	19	0.68	89.66	128.76	43	35.03
下限	13	0.62	65.66	104.76	25	23.03

影响,其中风机效率计算式为

$$\eta = \frac{Pq}{100\pi Mn} \tag{1}$$

式中 P ——平均全压, Pa
 q ——体积流量, m^3/h
 M ——扭矩, $\text{N}\cdot\text{m}$ n ——转速, r/min

2.3.2 响应面模型

通过建立的设计变量,使用拉丁超立方试验设计(LHD),从样本空间中均匀随机抽取用于构建响应面模型的数据^[23-24],该方法通过最大化使每一个边缘分布分层,能够保证每一个变量范围的全覆盖。

由于该试验设计保留了蒙特卡罗法的随机性,使得 LHD 结果具有多样性,利用 Matlab 的 lhsnorm 函数获得 LHD 结果。该函数是总体抽样结果服从正态分布的拉丁超立方抽样函数,可通过修改参数使不同维度服从不同分布。样本空间和点数设为 6 和 38。对生成样本组分别建立模型进行数值模拟,得到每组样本对应风机风量 Q 和风机效率 η 。基于这些设计变量和响应,建立响应面优化模型。

试验设计后获取 38 个样本点,分别利用 LSR 响应面模型和 MLSM 响应面模型拟合优化目标与试验因素之间复杂的非线性响应关系,并对两个近似模型进行失拟性检测。

在多变量和多输出情况下,使用 MLSM 响应面模型拟合,该方法是通过在每个数据点的邻域内拟合局部二次曲面来逼近曲面。具体为

$$\left\{ \begin{aligned} \delta_1^{(h)} &= \sum_{i=1}^n w_i b_i = w b_1 \\ \delta_2^{(h)} &= \sum_{i=1}^n w_i b_i = w b_2 \end{aligned} \right. \tag{2}$$

式中 $\delta_1^{(h)}$ 、 $\delta_2^{(h)}$ ——输出响应变量预测值
 b_1 、 b_2 ——系数向量 w ——基函数向量

通过最小化拟合函数在每个数据点处的误差来确定系数向量 b_1 和 b_2 ; w 为采用 Pascal 三角形确定关于空间坐标的函数, $w = (w_1, w_2, \dots, w_n)$ 。

2.3.3 NASG-II 多目标遗传算法优化流程

针对离心风机的关键叶轮部件,本研究对叶片结构进行多目标优化设计,采用 NASG-II 多目标遗传算法^[25-26]在全局空间中搜索 Pareto 解集,以保证解集的分散性和准确性。遗传算法是一类借鉴生物界自然选择和遗传机制的随机搜索算法,具有良好的鲁棒性,能够在面对复杂优化问题时保持稳健的性能表现,NASG-II 多目标遗传算法优化流程如图 6 所示。

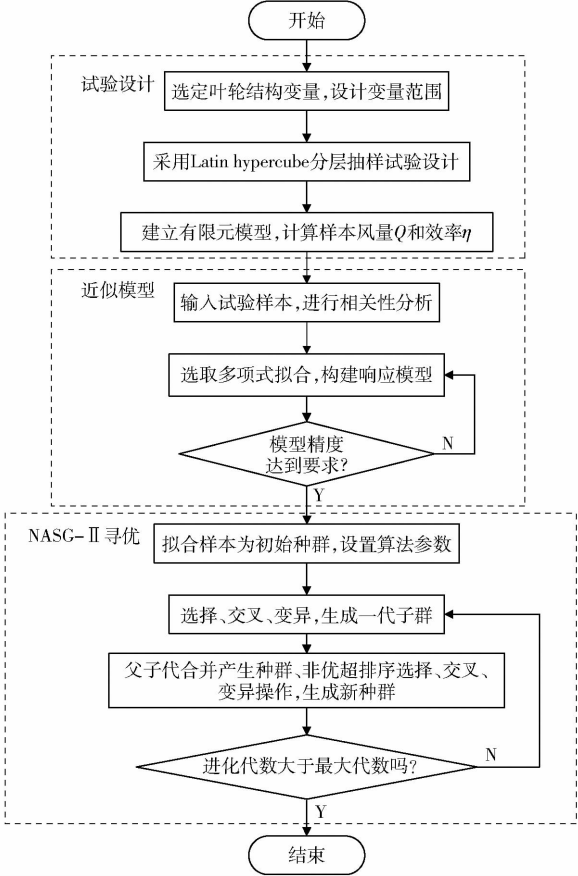


图 6 NASG-II 多目标遗传算法优化流程图

Fig. 6 Optimization process of NASG-II multi-objective genetic algorithm

优化数学模型为

$$\left\{ \begin{aligned} &\max Q(Z, D_1/D_2, \beta_1, \beta_2, R, L) \\ &\max \eta(Z, D_1/D_2, \beta_1, \beta_2, R, L) \\ &\text{s. t.} \left\{ \begin{aligned} &13 \leq Z \leq 19 \\ &0.62 \leq D_1/D_2 \leq 0.68 \\ &65.66^\circ \leq \beta_1 \leq 89.66^\circ \\ &104.76^\circ \leq \beta_2 \leq 128.76^\circ \\ &25 \text{ mm} \leq R \leq 43 \text{ mm} \\ &23.03 \text{ mm} \leq L \leq 35.03 \text{ mm} \end{aligned} \right. \end{aligned} \right. \tag{3}$$

基于优化结果进行数值计算验证模型精度,旨

在探究优化方案对风机性能的影响。

2.4 风机性能测试工作台

离心风机性能测试在宁风科技(宁波)有限公司专业实验室内进行,采用国家标准 GB/T 1236—2017《工业通风机用标准化风道性能试验》中的 C 型试验装置对风机的空气动力学性能进行测试,如图 7 所示。

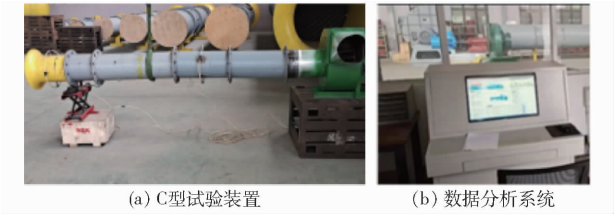


图 7 性能测试平台

Fig. 7 Performance test platform

测试平台主要仪器包括绝压、压力、温度变送器,温湿度传感器以及电能综合测试仪和转速仪。在试验过程中保持室内的通风环境一致,各装置固定不变,将风机性能设备入口连接到风扇的进口风管,通过弧形进口、电测法测功方法与数据分析系统,得出风机风量与风机效率。

3 数值计算结果与分析

3.1 仿真试验结果分析

数值模拟采用的计算方法与原型机相同,各试验方案以风机风量、风机效率最大的工况点作为数值模拟工况点,38 组试验方案和数值计算结果如表 3 所示。获得样本点后,选取合适的近似表达式来建立优化变量与目标函数之间代理模型。LSR 近似模型多项式为

$$Q = -53\,963.75 - 335.384A + 126\,884.436B + 255.919C + 21.490D + 240.127E + 127.063F - 6.642A^2 - 111\,849.209B^2 - 0.369C^2 - 0.799D^2 - 0.019E^2 - 0.845F^2 + 379.649AB + 2.053AC + 2.081AD - 0.602AE - 1.341AF - 284.771BC + 329.207BD - 79.829BE + 65.659BF - 0.128CD - 1.063CE - 0.119CF - 0.693DE - 0.693DF - 0.400\,2EF \quad (4)$$

$$\eta = 67.46 - 2.436A - 372.620\,4B + 1.376C - 0.189\,5D + 1.437E + 1.379F - 0.021A^2 - 147.267B^2 + 0.000\,98C^2 - 0.003\,6D^2 - 0.002\,2E^2 - 0.034F^2 - 0.565AB + 0.018\,3AC + 0.013\,8AD - 0.007\,7AE + 0.033AF - 2.256BC + 2.847BD + 0.316\,6BE + 1.885BF - 0.002\,3CD - 0.007\,6CE + 0.005\,4CF - 0.008\,4DE - 0.015DF + 0.005\,8EF \quad (5)$$

表 3 仿真试验设计与结果

Tab. 3 Simulation experiment design and results

序号	Z	D_1/D_2	$\beta_1/(\circ)$	$\beta_2/(\circ)$	R/mm	L/mm	$Q/(m^3 \cdot h^{-1})$	$\eta/\%$
1	19	0.67	77.66	112.76	25	29.03	4 272.02	32.70
2	16	0.62	69.66	120.76	40	27.03	4 308.18	31.39
3	16	0.65	81.66	108.76	28	25.03	3 964.24	30.35
4	14	0.68	77.66	128.76	37	23.03	4 509.48	33.99
5	13	0.66	77.66	112.76	31	25.03	4 022.03	30.69
6	18	0.62	73.66	116.76	37	29.03	4 169.20	31.53
7	13	0.62	77.66	104.76	25	35.03	3 642.56	27.62
8	15	0.66	65.66	128.76	34	35.03	4 606.07	31.75
9	19	0.65	69.66	124.76	31	31.03	4 602.73	33.84
10	19	0.67	65.66	112.76	34	23.03	4 304.98	30.87
11	18	0.68	77.66	116.76	43	35.03	4 317.92	33.19
12	19	0.63	69.66	120.76	40	23.03	4 424.38	30.99
13	15	0.62	81.66	120.76	25	35.03	4 111.94	29.79
14	13	0.64	89.66	112.76	43	29.03	3 804.93	29.62
15	14	0.65	73.66	124.76	34	23.03	4 437.86	32.64
16	15	0.64	89.66	104.76	43	27.03	3 729.14	29.60
17	19	0.68	65.66	108.76	40	33.03	4 169.05	33.22
18	18	0.65	89.66	120.76	43	33.03	4 205.95	31.90
19	17	0.64	73.66	108.76	28	29.03	4 032.12	30.68
20	14	0.67	81.66	120.76	31	31.03	4 283.56	32.87
21	14	0.63	81.66	116.76	37	29.03	4 114.29	30.71
22	16	0.66	89.66	124.76	34	31.03	4 334.69	32.93
23	18	0.65	81.66	108.76	28	35.03	4 026.12	31.60
24	17	0.67	89.66	112.76	31	35.03	4 055.51	32.19
25	13	0.66	77.66	104.76	43	33.03	3 870.37	30.54
26	15	0.68	69.66	128.76	25	27.03	4 704.90	36.92
27	15	0.65	85.66	120.76	25	23.03	4 366.14	32.46
28	15	0.68	73.66	112.76	37	35.03	4 183.58	32.10
29	18	0.66	73.66	116.76	31	29.03	4 411.97	32.98
30	14	0.64	89.66	104.76	25	33.03	3 692.75	29.86
31	18	0.67	69.66	128.76	34	29.03	4 911.87	36.30
32	13	0.62	65.66	116.76	40	33.03	4 093.70	29.76
33	13	0.65	89.66	112.76	37	31.03	3 822.67	30.13
34	17	0.66	77.66	128.76	37	31.03	4 613.10	33.57
35	13	0.64	85.66	116.76	37	23.03	3 993.54	29.68
36	16	0.63	85.66	116.76	40	33.03	4 148.53	31.01
37	19	0.64	89.66	108.76	43	29.03	3 988.30	31.61
38	14	0.68	81.66	124.76	25	31.03	4 422.42	33.70

MLSM 近似模型无具体表达式,其拟合系数为 5.0,冗余样本点数量为 3,加权函数采用高斯函数。两个近似模型建立后,利用 38 组样本拟合进行模型诊断,分析结果见表 4。结果表明 LSR 近似模型在风机风量和风机效率的预测上,总体上优于 MLSM 近似模型。风机风量预测 LSR 模型最大绝对误差为 50.008 1 m³/h,MLSM 为 76.630 6 m³/h;在风机效率预测中,LSR 最大绝对误差为 0.384 4%,MLSM 为 0.699 0%,在极端情况下 LSR 模型稳健性优于

表 4 代理模型检验

Tab.4 Check of surrogate model

统计项		确定性 系数	绝对 偏差 均值比	最大绝对 误差	均方根 误差
风机风量	LSR	0.996 0	0.048 4	50.008 1 m ³ /h	18.005 8 m ³ /h
	MLSM	0.994 3	0.052 5	76.630 6 m ³ /h	21.505 0 m ³ /h
风机效率	LSR	0.995 4	0.047 6	0.384 4%	0.123 3%
	MLSM	0.986 6	0.090 9	0.699 0%	0.212 5%

MLSM 模型。因此,在进行风机性能预测时,LSR 模型可作为一种更可靠的选择。

Spearman 是衡量两个变量依赖性的非参数指标^[27]。离心风机风量 Q 和风机效率 η 的 Spearman 相关性分析结果如图 8 所示 (Q' 、 η' 为 LSR 模型拟合后结果)。

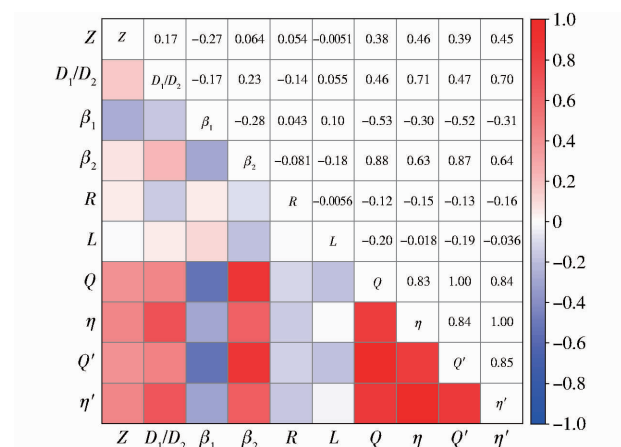


图 8 Spearman 相关性分析结果

Fig. 8 Spearman correlation analysis results

Spearman 相关性分析显示,离心风机风量 Q 和效率 η 与不同设计参数有着不同程度的相关性。从图 8 中可以看出,在 6 个因子中,叶片进口安装角 β_1 和叶片出口安装角 β_2 对风量 Q 的影响最大, β_1 和 Q 的相关系数为 -0.53 ,表现为负相关, β_2 和 Q 的相关系数为 0.88 ,表现为正相关,叶轮内外径比 D_1/D_2 和叶片出口安装角 β_2 对风机效率 η 的影响最大。 D_1/D_2 和 η 的相关系数为 0.71 。 β_2 和 η 的相关系数为 0.63 ,达到高相关程度。另外,LSR 模型拟合后的结果 Q' 和 η' 与原始的风量 Q 和风机效率 η 有着高度的一致性,验证了 LSR 模型对于预测离心风机性能的可靠性。

本研究自变量和目标参数过多,无法直接观察到所有参数的响应面关系,因此选择风机风量 Q 和风机效率响应面模型,如图 9 所示,不同自变量对质量影响的灵敏度不同(图上反映为响应面的斜度),可以看到随自变量的增加,位移响应呈上升趋势。

3.2 优化结果分析

基于 LSR 模型稳健性更高,采用具有快速非支

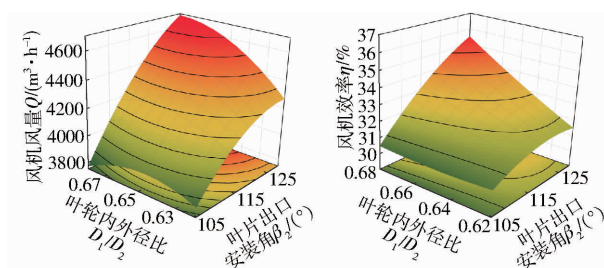


图 9 响应面

Fig. 9 Response surfaces

配序列、精英保留策略等优点的 NSGA-Ⅱ 算法对 LSR 模型求解。选择父代群体交叉概率为 0.8, 种群代数为 25, 种群规模设置为 410, 突变概率为 0.01, 交叉概率为 0.8, 经过计算求解, 得出多目标优化的 Pareto 最优解集以及迭代散点图, 如图 10 所示。

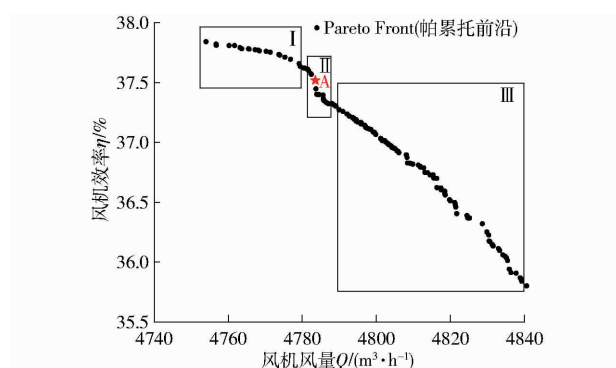


图 10 Pareto 最优解集与迭代散点图

Fig. 10 Pareto optimal solution set and iteration scatter plot

由图 10 可知,随着风机效率增大,风机风量降低;在风机效率大于 37.63% 的区域 I 和风机效率小于 37.27% 的区域 III 内,风机风量随着风机效率增大而下降,而风机效率在 37.27% ~ 37.63% 的区域 II 内风机风量变化缓慢;由于两者之间相互约束,故在区域 II 中选择合理参数 A 保证风机风量和风机效率同时得到优化,确定仿生叶片最优参数分别为: $Z=19$, $D_1/D_2=0.67$, $\beta_1=73.86^\circ$, $\beta_2=128.74^\circ$, $R=25.28\text{ mm}$, $L=24.95\text{ mm}$ 。以这组参数建立有限元模型,在相同叶轮转速下,分别对原型风机与优化风机进行数值计算与风机气动性能试验,试验结果如表 5 所示。

由表 5 可知,优化风机试验结果与原始风机相比,风量增加 $362.82 \text{ m}^3/\text{h}$,提升 8.41% ,风机效率增加 4.27 个百分点;优化风机数值仿真结果与原始风机相比,风量增加 $381.22 \text{ m}^3/\text{h}$,提升 8.63% ,风机效率增加 4.33 个百分点,预测风量与 CFD 计算结果相比误差不超过 6% 。LSR-NSGA-II 算法预测精度较高,证明本研究优化结果可靠。

表 5 优化前后性能对比

Tab.5 Performance comparison before and after optimization

风机类型	参数类型	$Q/(m^3 \cdot h^{-1})$	$\eta/\%$
优化风机	现场试验	4 675.47	35.68
	数值仿真	4 795.45	37.52
	相对误差/%	2.56	5.15
原始风机	现场试验	4 312.65	31.41
	数值仿真	4 414.23	33.19
	相对误差/%	2.35	5.66

3.3 流场结果分析

3.3.1 风机内部流场分布特征分析

基于优化前后数值计算结果,选取额定工况转速 1 420 r/min 时优化前后内部流场进行对比分析,明确优化后风机气动性能提升的原因。为便于分析风机内部不同位置流场特征,沿风机轴向距离分别取 $H=0.06\text{ m}$ 处截面 S1(靠近进风口)、 $H=0.135\text{ m}$ 处截面 S2(靠近叶轮中部)、 $H=0.21\text{ m}$ 处截面 S3(远离叶轮进风口)。沿叶轮顺时针方向,依次取 360° 、 90° 、 180° 和 270° 共 4 个观测位置,其中 90° 观测位置靠近风机蜗舌区域,如图 11 所示。

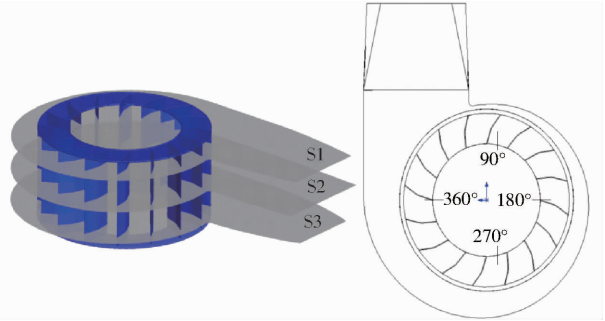


图 11 风机内部观测位置示意图

Fig. 11 Observation surface of fan flow field

为进一步探究优化前后离心风机内部流场流动特征,截取整体风机截面 S1、S2、S3 静压分布,如图 12 所示。压力沿叶轮进风口到出风口逐渐提高;在蜗舌前端(框线区域)形成局部低压区;优化后的离心风机进风口低压区更低,这是由于优化后风机产生更大离心力造成的,气流更有利于进入叶轮流道,同时蜗舌前端低压区范围更大、压力更低,使得气流流动分离后进入流道气流更多,做功能力更强,宏观表现出优化风机风量更大。

图 13 为优化前后风机叶轮不同高度轴向截面速度流线对比。从截面 S1、S2、S3 可知,气流沿着流道方向进风口到出风口逐渐升高,在蜗舌前端形成一个局部高速区($0^\circ \sim 90^\circ$ 观测范围);叶轮进风口形成低速区,尤其在靠近进风口处(截面 S1),叶间流道内最易形成漩涡,流动分离最为严重;对比优化

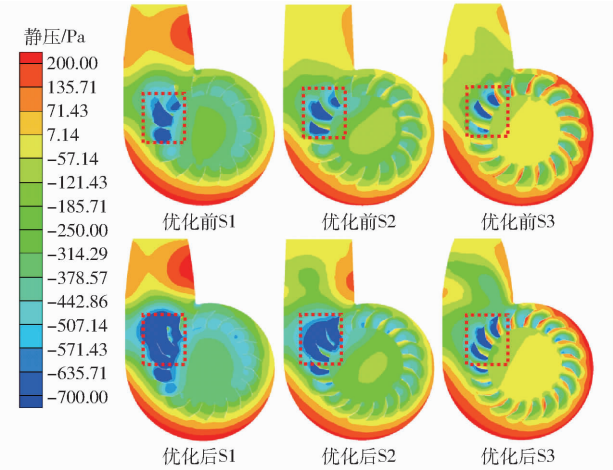


图 12 不同截面风机内部流场静压分布

Fig. 12 Static pressure distributions in different cross sections of centrifugal fan

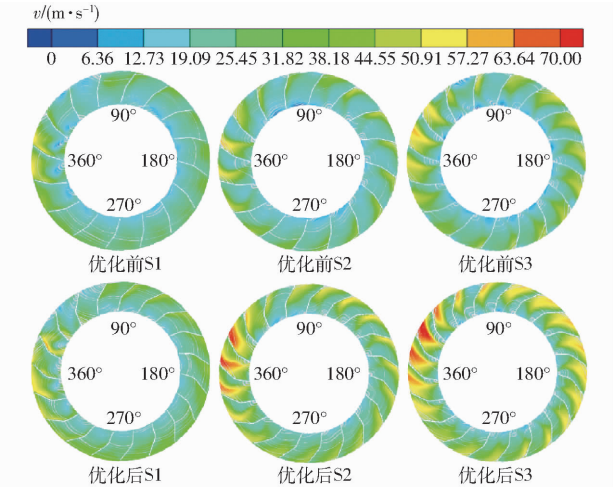


图 13 不同截面叶道流线对比

Fig. 13 Velocity fields and streamlines distributions in different cross sections of centrifugal fan

前风机,优化后风机局部高速区($0^\circ \sim 90^\circ$ 观测范围)流速更高,进风口低速区的速度更大,优化后速度流线更加均匀,内部流速高于优化前。进一步说明在相同转速下,优化后风机风量更大、气流更流畅,这是由于优化后叶轮出口角的增大与整体叶型轮廓弯曲度调整后更符合气流流向,对气流有很好的引流与做功作用,抑制叶间流道涡流产生,同时减少离心风机内部的能量损失。

图 14 为截面 S2 风机内部及蜗舌部位湍动能分布情况,能量消耗主要在叶轮的 $0^\circ \sim 90^\circ$ 方向范围内和叶轮与蜗舌间隙位置;优化后叶轮能量耗散区以及耗散程度均得到改善,其中蜗舌间隙处湍动能得到明显减小,说明优化后离心风机内部流体运动更稳定、能量输出更集中,通过 LSR-NSGA-II 算法模型组合设计的叶片轮廓使得离心风机内部气流流动稳定情况得到有效改善,减少了离心风机内部能量分散与损失。

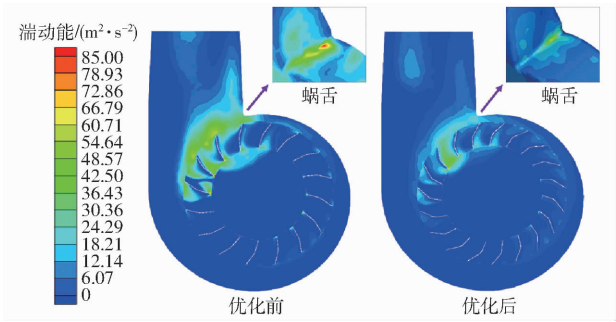


图 14 风机内部及蜗舌部位湍动能对比

Fig. 14 Turbulence energy in centrifugal fan and its tongue

叶轮出口截面径向速度分布如图 15 所示,沿径向距离做叶轮外径 D_2 的 0.875、0.975 倍曲面展开图,同时蜗舌位置确定为 76.8° 的红色竖直线。从优化前后叶轮出口的径向速度云图可以看出,径向速度沿圆周分布呈非对称分布,在叶轮前盘 ($H = 0.08\text{ m}$) 周向角度 Δ 为 $0^\circ \sim 90^\circ$ 区域,存在径向速度值为负的回流单元,尤其是蜗舌前端 (60° 区域) 时最显著,这是由蜗舌引起的阻塞效应导致的,靠近出风口时阻塞最严重。优化后叶轮出口径向速度大幅度提高、分布面积更广 ($0^\circ \sim 210^\circ, 300^\circ \sim 360^\circ$),减弱了蜗舌阻碍气流的不利影响,表现出离心风机风量得到提高以及叶道回流现象得到改善。

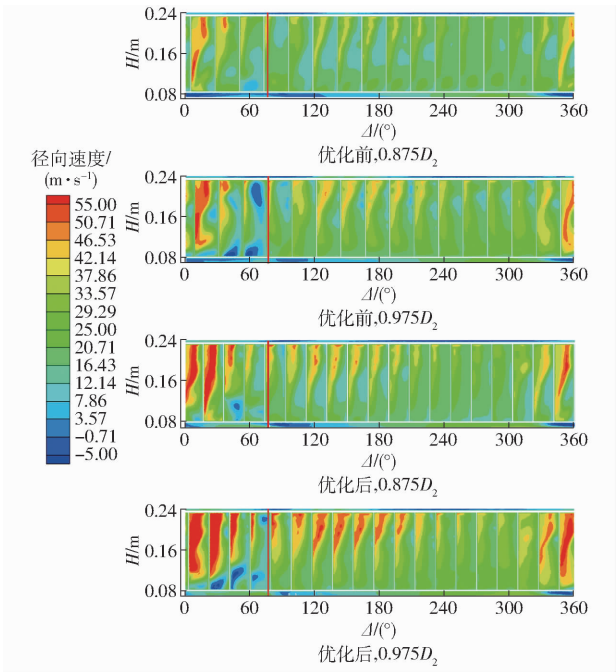


图 15 叶轮出口截面径向速度对比

Fig. 15 Comparison of velocities in impeller outlet section

3.3.2 摇青桶内部流场分析

为了更好分析风机优化后摇青机实际摇青效果,对摇青桶内部热风速度与温度场进行仿真对比。湍流模型采用 $SST-k-\gamma$ 模型^[28-29],设置流体为不可压缩气体,空气密度为 1.165 kg/m^3 ,粘度为 $1.859 \times 10^{-5}\text{ Pa}\cdot\text{s}$,初始模型进风口速度为

21.71 m/s ,优化模型出风口速度为 24.74 m/s ,根据实际摇青工况要求设置入口风温为 323.15 K 。模拟风机优化前后,摇青桶内实际工况下速度分布、温度分布云图,并分析摇青品质提升原因。

图 16 为摇青桶轴向断面速度分布云图,热风从内部风管吹入,桶内(风管之外区域)空气流动不均匀,主要集中在进风口周围。由图 16 可得,优化前桶内气流分布跨度大,桶内最高流速在 10 m/s 左右,而远离进风口处速度大致在 $1 \sim 3\text{ m/s}$ 范围,不利于整桶茶叶均匀走水与呼吸作用。优化后由于风机风量增大,桶内流速增加,普遍集中在 $8 \sim 10\text{ m/s}$,加强了桶内各处气流的均匀流动,有利于整桶茶叶充分走水与增强呼吸作用,可提升茶叶摇青品质。摇青桶轴向断面温度分布云图如图 17 所示,高温主要分布在风管周围,在靠近外桶位置存在局部低温区,造成区域温差较大,桶内温度不均匀。由图 17 对比可得,优化前桶内低温区域较大且风布不均匀,而优化后风量更大,桶内整体温度升高,气流温度分布相对更加均匀,桶内气流温度范围主要集中在符合武夷岩茶摇青要求的 $311 \sim 313\text{ K}$ (摇青适宜温度为 $309 \sim 313\text{ K}$),更有利于桶内茶叶的充分走水,提升做茶品质。

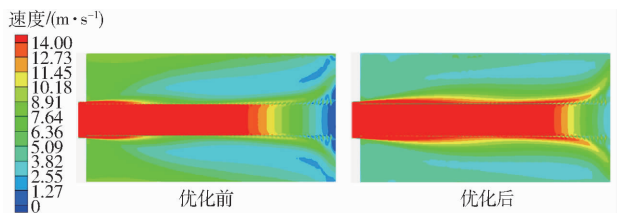


图 16 摇青桶轴向断面速度分布云图

Fig. 16 Velocity distribution cloud map of axial section of shaking bucket

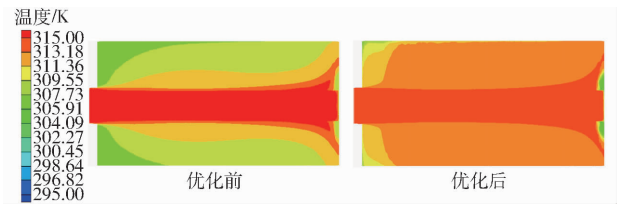


图 17 摇青桶轴向断面温度分布云图

Fig. 17 Temperature distribution cloud map of axial section of shaking bucket

4 摇青试验

4.1 试验样机

优化后离心风机风量与风机效率均得到显著提升。为进一步验证优化前后风机对摇青机实际做茶效果影响,2024 年 4 月在武夷山香江茶业有限公司以武夷水仙为例开展摇青效果对比试验,研制的武夷岩茶摇青机样机如图 18 所示。

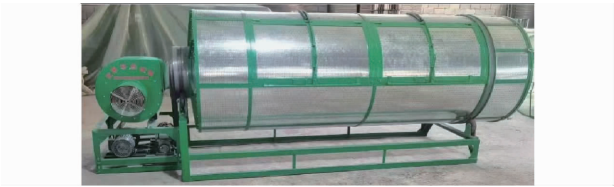


图 18 武夷岩茶摇青机样机

Fig. 18 Wuyi rock tea shaking machine prototype

茶青经过日光萎凋后送入摇青机中进行摇青,促进茶叶进一步走水的同时通过不断摩擦造成茶叶细胞损伤,促进茶多酚酶氧化、诱发茶香释放,最终达到茶叶表面“绿叶红镶边”效果,可进行后续发酵。对此,摇青后茶叶含水率以及茶叶表面感官审评得分成为关键参考^[30]。本试验选取摇青过程不同时间梗、叶部位含水率以及抽样茶叶样本进行感官审评,进行优化前后摇青效果对比试验验证。

4.2 试验结果与分析

4.2.1 茶叶梗、叶部位含水率

根据 GB/T 8303—2013《茶水分测定》,含水率公式为

$$\omega_i = \frac{g_i - g_0}{g} \times 100\%$$
 (6)

式中 ω_i ——时间 i 时茶叶含水率, %
 g_i ——容器与茶叶试样干燥前质量, kg
 g_0 ——容器与茶叶试样干燥后质量, kg
 g ——茶叶试样干燥时质量, kg

加工过程茶叶梗、叶部位含水率如图 19 所示。由图 19 可知,在满足 10 h 的摇青工况条件下,水仙叶梗部位与叶片表面前期含水率降低幅度大,后期降低幅度小,叶梗部位含水率仍高于叶片部位。对比可以看出,优化设备摇青过后水仙的叶梗与叶片部位含水率降低均少于优化前,降低速度更快。在适宜摇青时间 8 h 时,优化后叶梗部位相较于优化前平均走水提高 2.05 个百分点,叶片平均走水提高 3.15 个百分点,相同时间优化后茶叶走水效果显著,这是因为优化后叶片型线更符合气流流动,叶轮做功效果显著,提高了离心风机风量,实现了更优的

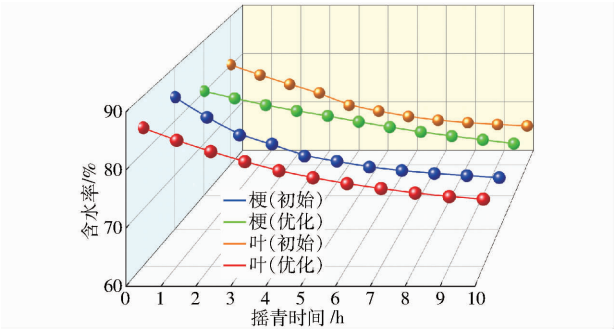


图 19 摇青工序下水仙茶叶梗、叶部位含水率变化曲线

Fig. 19 Variation curve of water content changes of narcissus peduncle and leaf parts under shaking process

摇青效果。

4.2.2 茶叶感官审评得分

根据国标 GB/T 23776—2018《茶叶感官审评方法》,对优化前后加工武夷水仙茶叶的外形特征、汤色、香气、滋味、叶底特征所占比例进行审评得分^[31]。针对优化前后摇青机摇青完成的同等茶叶进行同样加工处理,最终对茶叶成品进行 3 次抽样与感官审评,各项指标得分结果如表 6 所示。表中:单批次得分 = 外形特征得分 × 20% + 汤色得分 × 30% + 香气得分 × 30% + 滋味得分 × 10% + 叶底特征得分 × 10%^[31]。结果表明:优化后设备加工过的茶叶感官审评得分提高一个等级,摇青机整体茶叶摇青效果得到明显改善,进一步说明优化后风机风量增大,摇青桶内气流分布相比优化前更加均匀,做茶品质更有保证。

表 6 摇青工序下水仙茶叶抽样感官审评得分

Tab. 6 Sensory review score of Narcissus samples under shaking process

评分类型	优化前			优化后		
	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 1 次	第 2 次	第 3 次
外形特征	84.0	85.0	84.0	91.0	93.0	92.0
汤色	84.0	81.0	82.0	93.0	92.0	90.0
香气	85.0	83.0	83.0	90.0	90.0	91.0
滋味	87.0	87.0	85.0	89.0	91.0	90.0
叶底特征	82.0	84.0	83.0	92.0	92.0	90.0
单批次	84.4	83.3	83.1	91.2	91.5	90.7
综合值	83.6			91.4		

5 结论

(1)对于武夷岩茶摇青机所用离心风机,叶片进口安装角与叶片出口安装角对风机风量影响最大,相关系数分别为 -0.53 与 0.88;叶轮内外径比与叶片出口安装角对风机效率影响最大,相关系数分别为 0.71 与 0.63,达到高相关程度。当叶片数 $Z = 19$ 、叶轮内外径比 $D_1/D_2 = 0.67$ 、叶片进口安装角 $\beta_1 = 73.86^\circ$ 、叶片出口安装角 $\beta_2 = 128.74^\circ$ 、叶片折弯半径 $R = 25.28\text{ mm}$ 、叶片进口直径 $L = 24.95\text{ mm}$ 时,风机风量与风机效率最优值为 $4\,795.45\text{ m}^3/\text{h}$ 与 37.52% 。

(2)相对原型风机,优化后风机风量增加 $381.22\text{ m}^3/\text{h}$,风机效率提高 4.33 个百分点,试验测量结果验证了本文优化设计的有效性。通过数值结果分析,发现优化后叶片叶型更符合气流流向,能够有效抑制叶道内流动分离,进而增大风机风量。风量增加后,摇青桶内气流速度场、温度场分布更加均匀,茶叶加工走水效率提高,设备整体摇青效果提

升,做茶品质更有保证。

(3)采用本文优化设计的离心风机,有效提升了武夷岩茶摇青机实际工况作业性能,叶梗、叶片平均走水分别提高 2.05、3.15 个百分点,做茶感官审评平均得分高达 91.4,提升茶叶摇青效果的同时,提高了实际茶叶加工效率。

参 考 文 献

[1] 占鑫怡,杨云,陈彬,等.不同摇青程度春闽北乌龙茶品质差异分析[J].食品工业科技,2023,44(11):271-279.
ZHAN Xinyi, YANG Yun, CHEN Bin, et al. Difference analysis of major quality components in different turning over intensities of Chungui oolong tea in northern Fujian [J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(11): 271-279. (in Chinese)

[2] 朱河承,王伟伟.武夷岩茶的品质及加工技术研究进展[J].中国茶叶,2024,46(9):28-33.
ZHU Hecheng, WANG Weiwei. Research progress on the quality and processing technology of Wuyi rock tea[J]. China Tea, 2024, 46(9): 28-33. (in Chinese)

[3] 吴文斌,闫磊.闽北乌龙茶加工工艺流程探究[J].现代食品,2022,28(1):71-73.
WU Wenbin, YAN Lei. Study on the processing process of oolong tea in northern Fujian[J]. Journal of Food Science and Technology, 2022, 28(1): 71-73. (in Chinese)

[4] 阮承治,杨君,叶希梅,等.一种岩茶摇青机:CN211672247U [P]. 2020-10-16.

[5] 王秀萍,金心怡,陈常颂,等.不同气流条件下做青过程青叶的呼吸作用[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2008,53(1):80-83.
WANG Xiuping, JIN Xinyi, CHEN Changsong, et al. Studies on respiration of tea leaves during fine manipulation on different airflow condition[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2008, 53(1): 80-83. (in Chinese)

[6] 王秀萍.做青环境对青叶生理生化变化及毛茶品质的影响新探[D].福州:福建农林大学,2002.
WANG Xiuping. New studies on effect of finely-manipulated environment on variations of physiological and biochemical of leaves and quality during oolong tea process [D]. Fuzhou: Fujian Agricultural and Forestry University, 2002. (in Chinese)

[7] 陈霓,田立权,张正中,等.半喂入联合收获机双圆锥离心式清选风机设计与试验[J].农业机械学报,2022,53(12):193-202.
CHEN Ni, TIAN Liqun, ZHANG Zhengzhong, et al. Design and experiment on double conical centrifugal cleaning fan of headfeed combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(12): 193-202. (in Chinese)

[8] 王维,李轩,卢金玲,等.叶轮弧盘及锥盘型线对高比转速离心通风机性能的影响[J].农业工程学报,2018,34(24):52-59.
WANG Wei, LI Xuan, LU Jinling, et al. Effect of arc and taper plate impellers on performance of high specific speed centrifugal fan[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(24): 52-59. (in Chinese)

[9] CHAI X, XU L, SUN Y, et al. Development of a cleaning fan for a rice combine harvester using computational fluid dynamics and response surface methodology to optimise outlet airflow distribution[J]. Biosystems Engineering, 2020, 192: 232-244.

[10] 陈建能,陈倩雯,刘林敏,等.旋转式两工位名优茶采摘收集一体末端执行器设计与试验[J].农业机械学报,2024,54(10):136-144.
CHEN Jianneng, CHEN Qianwen, LIU Linmin, et al. Design and experiment of rotating two workstations integrated effector for famous tea picking and collection[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 54(10): 136-144. (in Chinese)

[11] 李兵,方赛弟,朱勇,等.名优茶连续式理条机参数优化设计与试验[J].农业工程学报,2024,40(10):276-287.
LI Bing, FANG Saidi, ZHU Yong, et al. Parameter optimization design and experiment of famous tea continuous carding machine[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(10): 276-287. (in Chinese)

[12] 刘江,沈春根,林传生.多翼离心风机蜗壳气动性能与出风均匀性优化设计[J].排灌机械工程学报,2024,42(6):591-597,604.
LIU Jiang, SHEN Chungen, LIN Chuansheng. Optimization design of aerodynamic performance and outlet air uniformity of multiblade centrifugal fan volute[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2024, 42(6): 591-597, 604. (in Chinese)

[13] XU W, CHEN G, SHI H, et al. Research on operational characteristics of coal power centrifugal fans at off-design working conditions based on flap-angle adjustment[J]. Energy, 2023, 284: 129363.

[14] 杨君,阮承治,黄毅彪,等.茶叶滚筒式摇青机结构优化设计及内部流场数值模拟研究[J].江西农业大学学报,2020,42(6):1260-1269.
YANG Jun, RUAN Chengzhi, HUANG Yibiao, et al. A study of structure optimization design and internal flow field numerical simulation of tea roller stirring machine [J]. Journal of Jiangxi Agricultural University, 2020, 42(6): 1260-1269. (in Chinese)

[15] 刘阳,刘小民,陈宗华,等.多翼离心风机分组优化设计对风机盘管整机气动性能的响应度研究[J].西安交通大学学

- 报, 2022, 56(7): 156–167.
- LIU Yang, LIU Xiaomin, CHEN Zonghua, et al. Responsiveness of grouping optimization design of multi-blade centrifugal fan to aerodynamic performance of fan coil unit[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022, 56(7): 156–167. (in Chinese)
- [16] TANG H, XU C, ZHAO J, et al. Formation and steady state characteristics of flow field effect in the header of a stripping prior to cutting combine harvester with CFD[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 211:107959.
- [17] 王福军. 流体机械旋转湍流计算模型研究进展[J]. 农业机械学报, 2016, 47(2): 1–14.
WANG Fujun. Research progress of computational model for rotating turbulent flow in fluid machinery[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(2): 1–14. (in Chinese)
- [18] WU L, LIU X, WANG M. Effects of bionic volute tongue on aerodynamic performance and noise characteristics of centrifugal fan used in the air-conditioner[J]. Journal of Bionic Engineering, 2020, 17(4): 780–792.
- [19] BAI M, LIU Z, LING Y, et al. Effect of impeller structure on aerodynamic performance and noise reduction of a small multi-blade centrifugal fan[J]. Science and Technology for the Built Environment, 2024, 30(6): 563–578.
- [20] 胡斯特, 吴金鑫, 胡小文, 等. 油烟机多翼离心风机气动噪声源及贡献度研究[J]. 流体机械, 2023, 51(12): 64–70.
HU Site, WU Jinxin, HU Xiaowen, et al. Study on main noise sources and partition contribution of a multi-blade centrifugal fan in a range hood[J]. Fluid Machinery, 2023, 51(12): 64–70. (in Chinese)
- [21] GAO P, LU M, LI H, et al. Greenhouse environmental control target constrained by discrete surface curvature and multi-objective optimization algorithm[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 215: 108431.
- [22] KONG C, WANG M, JIN T, et al. The blade shape optimization of a low-pressure axial fan using the surrogate-based multi-objective optimization method[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2023, 37(1): 179–189.
- [23] 王镇, 李震, 吴兰勇, 等. 基于敏感性分析降维的多翼离心风机叶轮优化设计[J]. 工程热物理学报, 2023, 44(2): 397–405.
WANG Zhen, LI Zhen, WU Lanyong, et al. Optimal design of squirrel-cage fan impeller based on sensitivity analysis and dimension reduction[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2023, 44(2): 397–405. (in Chinese)
- [24] ZHOU S, XU B, LU L, et al. Multi-objective optimization of rear guide vane of diagonal flow fan based on robustness design theory[J]. Applied Sciences, 2022, 12(19): 9858.
- [25] ZHU M, LI Z, LI G, et al. An investigation on optimized performance of voluteless centrifugal fans by a class and shape transformation function[J]. Processes, 2023, 11(6): 1751.
- [26] LI K, SHA Z, XUE W, et al. A fast modeling and optimization scheme for greenhouse environmental system using proper orthogonal decomposition and multi-objective genetic algorithm[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 168: 105096.
- [27] EJEGWA P A, WANZENKE T D, OGWUCHE I O, et al. A robust correlation coefficient for fermatean fuzzy sets based on spearman's correlation measure with application to clustering and selection process[J]. Journal of Applied Mathematics and Computing, 2024, 70(2): 1747–1770.
- [28] CARRETO-HERNANDEZ L G, MOYA S L, VARELA-BOYBO C A, et al. Analysis of natural convection in a representative cavity of a room considering oscillatory boundary conditions: an experimental and numerical approach[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2024, 206: 109357.
- [29] PARSAEI A, GOUDARZI K. Numerical investigation of the performance improvement of instantaneous gas water heater by introducing new geometries for the heat exchanger[J]. Journal of Building Engineering, 2024, 89: 109275.
- [30] 金心怡, 郭雅玲, 孙云, 等. 摇青不同机械力对青叶理化变化及乌龙茶品质的影响[J]. 福建农业大学学报, 2003, 51(2): 201–204.
JIN Xinyi, GUO Yaling, SUN Yun, et al. The effects of different rocking mechanical forces on the green leaf physiology and biochemistry and raw tea quality[J]. Journal of Fujian Agricultural University, 2003, 51(2): 201–204. (in Chinese)
- [31] 杨君, 刘木华, 阮承治, 等. 球罐型 360° 茶叶摇青机设计及实验验证[J]. 食品与机械, 2020, 36(10): 81–86.
YANG Jun, LIU Muhua, RUAN Chengzhi, et al. Design of spherical type 360° of tea stirring machine, flow field analysis and experimental analysis[J]. Food & Machinery, 2020, 36(10): 81–86. (in Chinese)