doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.22.019

基于 PEGO – Kriging 模型的闽北乌龙茶烘焙机优化与试验

阮承治[1,2]　黄熙莹[1]　丁旭昭[1]　杨　君[1,2]　陈雨婷[1]　郭　波[1,2]　洪永聪[3]　陈加友[4]

(1. 武夷学院机电工程学院, 武夷山 354300; 2. 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. 福建省茶产业大数据应用与智能化重点实验室, 武夷山 354300;
4. 福建佳友茶叶机械智能科技股份有限公司, 泉州 362400)

摘要: 为提升闽北乌龙茶烘焙机性能,本文提出 PEGO(Parallel efficient global optimization)算法对 Kriging 代理模型进行迭代寻优,以优化烘焙机结构并开展试验验证。采用最优拉丁超立方试验设计,以导流板倾斜角、排风口孔径、托盘数和侧边梯度孔孔数差值为优化变量设计 30 组样本数据,并进行数值模拟得到箱体温度标准差作为响应;根据样本数据构建描述优化变量与响应之间映射关系的 Kriging 代理模型,为求解闽北乌龙茶烘焙机结构参数的最优解集奠定基础;提出 PEGO 算法对 Kriging 代理模型进行迭代优化,得出最优参数组合并进行 Spearman 相关性分析。试验结果表明,托盘数与箱体温度标准差相关系数为 –0.83,达到高相关程度;侧边梯度孔孔数差值与箱体温度标准差相关系数为 –0.017,影响可忽略;最优参数组合为导流板倾斜角 8.30°、排风口孔径 25 mm、托盘数 9 个、侧边梯度孔孔数差值 3 个;相较于原型烘焙机,闽北乌龙茶新型烘焙机箱体温度标准差下降 86.49%,温度相对标准偏差降幅最大达 73%,速度相对标准偏差降幅最大达 43%,烘焙机内部受热更均匀;新型烘焙机叶片含水率为 3.88%,相较于原型烘焙机下降 13.78%,烘焙机性能得到有效提升。研究结果可为闽北乌龙茶烘焙机结构优化与性能提升提供重要理论基础和技术支持。

关键词: 闽北乌龙茶; 烘焙机; PEGO 算法; Kriging 代理模型; 结构优化; 数值模拟

中图分类号: S24　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2026)22-0225-11　　**OSID**:

Optimization and Testing of Baking Machine for Northern Fujian Oolong Tea Based on PEGO – Kriging Model

Ruan Chengzhi[1,2]　Huang Xiying[1]　Ding Xuzhao[1]　Yang Jun[1,2]　Chen Yuting[1]
Guo Bo[1,2]　Hong Yongcong[3]　Chen Jiayou[4]

(1. *School of Mechanical and Electrical Engineering*, *Wuyi University*, *Wuyishan* 354300, *China*
2. *Key Laboratory of Agricultural Machinery Intelligent Control and Manufacturing of Fujian Province University*, *Wuyishan* 354300, *China*
3. *Fujian Key Laboratory of Big Data Application and Intellectualization for Tea Industry*, *Wuyishan* 354300, *China*
4. *China Fujian Jiayou Tea Machinery Intelligent Technology Co.*, *Ltd.*, *Quanzhou* 362400, *China*)

Abstract: Aiming to enhance the performance of the Northern Fujian Oolong tea baking machine, the parallel efficient global optimization (PEGO) algorithm for iterative optimization of a Kriging surrogate model was proposed to optimize the structure of a baking machine and conduct experimental validation. An optimal Latin hypercube design was employed, with 30 sample sets generated using the following optimization variables: the inclination angle of deflector plate, the aperture of exhaust vent, tray count, and difference in the number of holes on the side gradient. Numerical simulations were conducted to obtain the standard deviation of chamber temperature as the response variable. Based on the sample data, a Kriging surrogate model describing the mapping relationship between optimization variables and response was constructed, laying the foundation for solving the optimal parameter set of the Northern

收稿日期: 2026 – 04 – 27　修回日期: 2026 – 05 – 30

基金项目: 国家自然科学基金项目(61903288)、福建省科技厅引导性项目(2026N0015)、福建省农业厅农业关键核心技术攻关项目(20251105)、福建省科技型中小企业技术创新资金项目(2025C0026)、福建省大学生“科创育苗”计划项目和武夷学院引进人才项目(YJ202320)

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

Fujian Oolong tea roaster. The PEGO algorithm was proposed to iteratively optimize the Kriging surrogate model, yielding the optimal parameter combination and performing Spearman correlation analysis tests. Results indicated that the correlation coefficient between tray count and the standard deviation of chamber temperature was −0.83, indicating a high correlation; the correlation coefficient between difference in the number of holes on the side gradient and the standard deviation of chamber temperature was −0.017, with negligible influence; the optimal parameter combination was: the inclination angle of deflector plate was 8.3°, the aperture of exhaust vent was 25 mm, tray count was 9, and difference in the number of holes on the side gradient was 3. Compared with the original roaster, the novel baking machine for Northern Fujian Oolong tea reduced the standard deviation of chamber temperature by 86.6%, with the maximum reduction in relative temperature standard deviation reaching 73% and relative velocity standard deviation reaching 43%, indicating more uniform internal heating. The moisture content of the blades in the new baking machine was 3.88%, a decrease of 13.78% compared with the prototype baking machine, demonstrating effective performance enhancement. The research result can provide a crucial theoretical foundation and technical support for structural optimization and performance enhancement of the Northern Fujian Oolong tea baking machine.

Key words: Northern Fujian Oolong tea; baking machine; PEGO algorithm; Kriging surrogate model; structural optimization; numerical simulation

0 引言

乌龙茶在中国六大茶类中工艺最为复杂,闽北乌龙茶核心产区集中于武夷山,其丹霞地貌赋予了闽北乌龙茶无与伦比的岩韵[1]。然而,福建地区普遍的高湿度环境使得乌龙茶在加工过程中面临返青、叶片霉变及香气物质流失等严峻挑战[2]。烘焙作为乌龙茶精加工中的关键工序[3],茶叶通过美拉德反应,不仅能显著增强香气、滋味与汤色[4-6],还能有效蒸发水分、杀灭附着微生物,从而延长贮藏期并保障安全卫生。传统人工烘焙依赖经验,易导致品质缺陷,制约闽北乌龙茶品质提升,而茶叶烘焙机的出现,使武夷岩茶在烘焙工序中释放茶产业新质生产力成为可能。

林荣川等[7]通过采用模糊交叉解耦 PID 控制方式并进行实际温湿度数据测试发现,电焙工艺具备温度与时间控制精度高、茶叶品质稳定性强的优势,但品茗时淡而无味,整体品质表现欠佳。Yuzo 等[8]通过试验得出结论,炭焙茶汤中丙烯酰胺含量显著低于未烘焙或高温电焙处理的样品,表明炭焙工艺可有效减少丙烯酰胺等有害物质的生成。高育森等[9]设计了自适应模糊 PID 控制系统并应用于炭焙烘焙机,研究结果显示,炭焙茶叶的感官审评高于电焙茶叶,进一步验证了炭焙工艺在提升茶叶品质方面的独特优势。邓余良等[10]采用 Box - Behnken 响应面设计法,针对远红外提香的工艺参数展开研究,证实远红外烘焙技术在温度控制的精准度与均匀性方面更具优势。为降低模拟烘焙机体的复杂程度,学者提出了通过构建高精度预测模型,在虚拟环境中模拟并进行机械优化。刘鑫等[11]采取合理的样本点加点策略,动态更新 Kriging 代理模型,从而在有限的优化次数内实现高精度的机械结构近似优化。

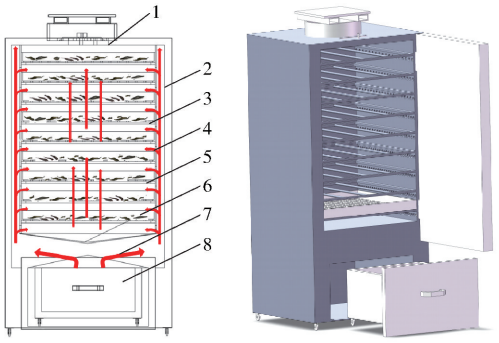
针对现有炭焙烘焙机温度均匀性差、单一远红外烘焙难以复现传统炭焙风味层次与品质特性,以及样机运行阶段箱体内温度场发布不均、局部温差偏大等问题,本文基于最优拉丁超立方与 PEGO - Kriging 模型,开展闽北乌龙茶“远红外-炭”烘焙机结构优化与试验,系统探究烘焙机结构参数对温度场均匀性的影响规律,以期提升茶叶烘焙品质稳定性,为闽北乌龙茶烘焙机结构优化与性能提升提供重要理论依据。

1 模型建立与数值分析

1.1 工作原理

图 1 为闽北乌龙茶“远红外-炭”烘焙机结构。工作时,置炭箱内木炭充分燃烧,对进风口空气进行加热。在导流风机驱动下,进风口热空气以流速 3 m/s 被输送至烘焙机体内部。热空气经入口导流板分流后进入机体两侧空腔,再通过侧边梯度孔在烘焙机体各层间形成循环气流场,同时在远红外加热管的持续稳定加热下,各层茶叶烘焙温度场均匀稳定。热空气穿透通孔板后,与茶叶充分接触完成强制对流换热,在红外辐射与对流热源的协同作用下实现快速脱水。最终,水蒸气经排风口排至外界。

针对烘焙机上层热量集中、温度偏高的问题,将侧边孔孔数设置为梯度递增结构。利用开孔数量差异化排布,合理调控各段通风量,平衡烘焙机内部温



(a) 内部剖面流场　　(b) 三维建模

图 1　闽北乌龙茶“远红外–炭”烘焙机结构

Fig. 1　Structure of Northern Fujian Oolong tea “far-infrared－charcoal” baking machine

1. 排风口　2. 箱体　3. 远红外加热管　4. 侧边梯度孔　5. 托盘　6. 导流板　7. 导流风机　8. 置炭箱

度场，改善局部过热缺陷，提升茶叶整体烘焙均匀性。侧边梯度孔孔数排列如图 2 所示。

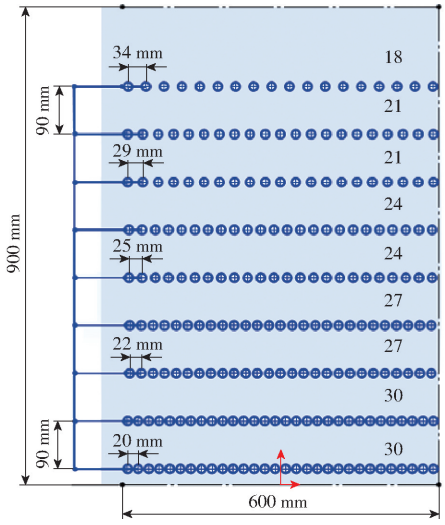


图 2　侧边梯度孔结构

Fig. 2　Side-gradient perforated structure

1.2　模型建立

1.2.1　基本假设

以闽北乌龙茶“远红外–炭”烘焙机为原型，结构参数为：导流板倾斜角 10°、排风口孔径 15 mm、托盘数 8 个、侧边梯度孔孔数差值 0 个。根据烘焙机结构特点及通风特性，为简化计算，对通风过程一些物理量作如下假设[12]：烘焙机内茶叶为各向同性的连续介质，孔隙内气流均匀流动；本模拟不涉及能量交换和组分的转移；流体介质为气体，视为理想气体、不可压缩、定常流动；任何流动情况均满足质量、能量和动量三大守恒定律。

1.2.2　湍流模型

采用工业广泛应用的 $k-\varepsilon$ 模型以及 SIMPLE 算法[13]对烘焙箱内部进行流场仿真，对于不可压缩流体流动，选用标准 $k-\varepsilon$ 方程计算流场[14]。标准 $k-\varepsilon$ 模型的湍动能 k 和耗散率 ε 方程为

$$\rho\frac{\mathrm{D}k}{\mathrm{D}t}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_i}\right]+G_k+G_b-\rho\varepsilon-Y_M \tag{1}$$

$$\rho\frac{\mathrm{D}\varepsilon}{\mathrm{D}t}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i}\right]+C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}(G_k+C_{3\varepsilon}G_b)-C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} \tag{2}$$

式中　k——湍动能，$\mathrm{m^2/s^2}$

ε——湍流耗散率，$\mathrm{m^2/s^2}$

μ——分子动力黏度，kg/(m·s)

μ_t——湍流动力黏度，kg/(m·s)

σ_k——湍动能 k 湍流普朗特数，取 1.0

ρ——流体密度，$\mathrm{kg/m^3}$

G_k——平均速度梯度引起的湍动能产生

G_b——浮力影响引起的湍动能产生

Y_M——过渡扩散所产生的波动，对于不可压缩流体，取 0

σ_ε——耗散率 ε 湍流普朗特数，取 1.3

$C_{1\varepsilon}$、$C_{2\varepsilon}$——系数，取 1.44、1.92

C_μ——湍流黏度系数，取 0.09

1.2.3　多孔介质模型

满载时空气经茶叶间隙流动，故将茶叶层简化为多孔介质模型[15]，将多孔区域简化为增加了阻力源的流体区域。多孔介质模拟是在标准流体流动方程中加入动量源项，动量源项由黏性损失与惯性损失组成[16-17]。均质多孔介质为

$$S_i=-\left(\frac{\mu}{\alpha}v_i+C_2\frac{1}{2}|v_i|v_i\right) \tag{3}$$

其中

$$\frac{1}{\alpha}=\frac{150(1-\varphi)^2}{D_\rho^2\varphi^3} \tag{4}$$

$$C_2=\frac{3.5(1-\varphi)}{D_\rho\varphi^3} \tag{5}$$

式中　C_2——惯性阻力系数

$1/\alpha$——黏性阻力系数

v_i——速度，m/s

D_ρ——多孔介质等效直径，取 1.296×10^{-4} m

φ——茶叶孔隙率，取 0.54

1.3　网格划分与数值分析

1.3.1　网格划分与网格无关性验证

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 Solidworks 软件对烘焙机进行建模，并用 Fluent Meshing 软件对烘焙机计算域模型进行非结构化网格划分。考虑到网格质量差异性，对进口和烘焙机内部连通区进行局部加密处理。简化后的网格划分包含茶叶层多孔介质区域和空气流通区

域,闽北乌龙茶烘焙机计算域网格划分如图 3 所示。对不同网格数量下各茶叶层温度进行监测,用 STDV. P 函数计算箱体温度标准差 σ 作为验证目标,对原型烘焙机计算域进行网格无关性验证,结果如图 4 所示。因此,选取整体网格数量为 4.26×10^6。

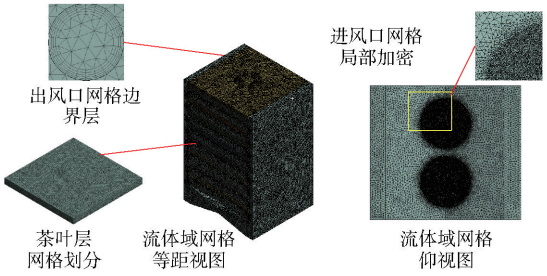


图 3 闽北乌龙茶烘焙机网格划分

Fig. 3 Grid layout of Northern Fujian Oolong tea baking machine

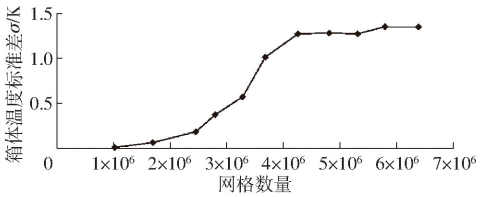


图 4 网格无关性验证

Fig. 4 Grid independence verification

1.3.2 数值分析设定

采用 ANSYS Fluent 对烘焙机内部进行数值计算。设置工作环境温度为常温(298.15 K),环境工作密度为 1.23 kg/m^3,重力加速度方向为 Y 轴负方向,大小为 9.80 m/s^2。设置进风口为热空气速度进口,进口初始温度为 383 K,排风口为自由出口,烘焙机壁面不产生移动、不与外界产生热量交换,因此壁面边界条件设置为无滑移壁面。对于定常流场计算,控制方程为三维平均 Navier - Stokes 方程,近壁面处理采用标准壁面函数,茶叶层应用多孔介质模型,其他流体区域为静止区域,压力速度耦合采用 SIMPLE 算法。能量控制亚松弛因子设置为 0.80,以便于收敛计算。流体运动连续方程中 3 个方向速度分量以及计算中 k、ε 收敛残差均设为 1×10^{-4},energy 收敛残差设置为 1×10^{-5},设置迭代次数为 1 000,通过监测各茶叶层平均温度变化情况判断是否收敛。

2 烘焙机结构优化设计

2.1 最优拉丁超立方设计

最优拉丁超立方设计[18-19](Optimal Latin hypercube design,OLHD)是在拉丁超立方设计的基础上采用优化准则对点间距离、势能、偏差等指标进行优化,以确保样本点在设计空间分布更均匀、相关性更低,从而提高采样效率、模型构建精度及全局搜索效果的方法。采用 Maximin 准则[20]进行闽北乌龙茶烘焙机的结构优化和试验。

通过数值模拟,选取 4 个对闽北乌龙茶“远红外-炭”烘焙机温度均匀性有影响的因子作为优化变量,其中导流板倾斜角度和排风口孔径为连续变量,托盘数和侧边梯度孔孔数差值为离散变量,并选取烘焙机箱体温度标准差作为试验指标。结合原型烘焙机箱体尺寸和结构,确定烘焙机参数取值范围:考虑箱体扣除茶叶放置层后的空间限制,导流板可调倾角存在约束,选取 5°、10°、15°、20°、25°进行仿真模拟,明确合理取值区间;参照原型烘焙机及现有同类设备排风口孔径规格,在箱内温度不易散失的前提下,划定排风口孔径取值范围。以原型烘焙机参数为基准,根据实际模型设计经验向外扩展得各优化变量的域分别为:导流板倾斜角 5°~10°、排风口孔径 10~25 mm、托盘数 7、8、9 以及梯度孔孔数差值 1、2、3。采用 OLHD 得到 30 组初始样本数据,样本数据空间分布如图 5 所示。由图 5 可知,30 组样本数据空间分布较为均匀。对试验方案进行数值模拟,结果如表 1 所示,表中 m 为托盘数,n 为梯度孔孔数差值。

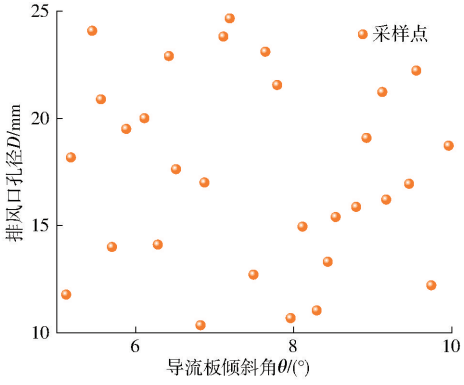


图 5 OLHD 采样空间分布图

Fig. 5 OLHD sampling space distribution map

2.2 Kriging 代理模型

2.2.1 Kriging 代理模型建立

Kriging 代理模型是一种对有限区域内目标变量进行无偏优化估计的数据插值方法[21],通过增加样本点提高模型近似精度[22]。采用 Kriging 代理模型对烘焙机结构参数进行优化,以提升烘焙机性能。基于 OLHD 及数值模拟得到 30 个样本数据集构建 Kriging 代理模型,模型表达式为

$$y(x)=f^{\mathrm{T}}(x)\beta+Z(x) \tag{6}$$

式中 $y(x)$——在 x 处模型预测响应值

$f^{\mathrm{T}}(x)$——模拟全局变量的回归计算模型

β——回归系数

$Z(x)$——预测方差为 S^2 的高斯随机过程

表 1　试验方案与结果

Tab. 1　Experimental design and results

序号	θ/(°)	D/mm	m/个	n/个	σ/K
1	8.29	11.04	8	3	0.97
2	9.17	16.21	8	2	0.98
3	6.87	17.01	9	3	1.19
4	8.79	15.87	8	1	0.96
5	8.43	13.31	9	1	0.72
6	7.64	23.11	8	1	1.04
7	5.88	19.51	8	1	1.57
8	7.19	24.67	7	2	2.38
9	8.11	14.95	9	3	0.84
10	6.28	14.11	7	2	1.88
11	9.96	18.73	7	2	2.30
12	6.51	17.63	7	2	2.14
13	6.11	20.01	9	1	1.23
14	6.42	22.91	8	2	1.28
15	9.46	16.95	8	3	0.56
16	9.55	22.23	8	3	0.75
17	8.53	15.40	8	3	1.06
18	9.74	12.21	7	3	2.61
19	7.79	21.56	8	3	0.78
20	7.96	10.68	7	2	2.14
21	9.12	21.23	9	2	0.33
22	5.56	20.89	7	2	2.38
23	6.82	10.35	8	2	1.51
24	7.11	23.82	8	2	1.00
25	5.45	24.09	8	2	1.10
26	8.92	19.09	8	2	0.86
27	7.49	12.71	9	2	0.41
28	5.70	14.00	8	1	1.59
29	5.12	11.78	8	2	1.31
30	5.18	18.18	9	1	0.51

2.2.2　代理模型精度检测

在建立代理模型过程中，使用模型决定系数 R^2 与均方根误差 RMSE 衡量预测值与真实值之间的线性相关程度与偏差程度，R^2 越趋近于 1 表示相关程度越高，RMSE 越趋近于 0 表示偏差程度越小，模型拟合精度越高。采用 PEGO 算法寻优，在算法迭代过程，不断加入新的样本点以更新代理模型，最终代理模型预测值和真实值如图 6 所示。

由图 6 可知，模型决定系数 R^2 为 1，均方根误差 RMSE 为 0.004 3 K，在已有样本点处预测值与真实值完全相同，符合 Kriging 代理模型插值特性。

2.3　PEGO－Kriging 模型

2.3.1　EGO 算法

EGO 算法[23]是基于 Kriging 代理模型的全局优化方法，核心思想是在优化过程中通过代理模型提供的预测均值和不确定性寻找期望改善(Expected improvement，EI)函数最大值，从而确定新采样点，

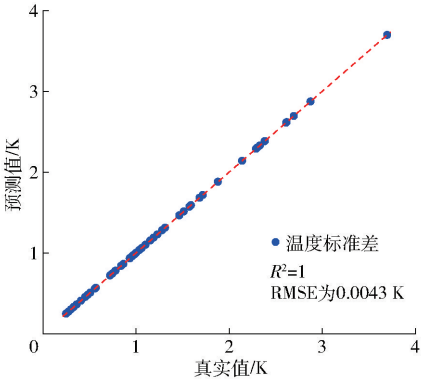


图 6　代理模型预测值与真实值

Fig. 6　Predicted values from proxy model *vs* actual value

以最小化函数调用次数并快速逼近全局最优解，实现全局搜索与局部搜索的平衡。EI 函数[24]表达式为

$$EI(x)=(h_{\min}-\hat{y}(x))\psi\left(\frac{h_{\min}-\hat{y}(x)}{s(x)}\right)+s(x)\phi\left(\frac{h_{\min}-\hat{y}(x)}{s(x)}\right) \tag{7}$$

式中　$h_{\min}$——最小响应值

$\hat{y}(x)$——均值

$\psi(\cdot)$——标准正态累积分布函数

$s(x)$——预测标准差

$\phi(\cdot)$——标准正态密度函数

2.3.2　PEGO 算法

Ginsbourger 等[25]提出 PEGO 算法，每次迭代可评估 q 个采样点，解决 EGO 算法每次迭代只能评估单个采样点的问题，可有效提高迭代速度。区别于 EGO 算法的 EI 函数，PEGO 算法采用 q－EI(q－Expected improvement)函数，在每次迭代中选取 q 个采样点 $X_q=\{x_1,x_2,\cdots,x_q\}$，使 q 个采样点的联合 EI 最大化，即在批量上求取整体的期望改进，q－EI 函数公式为

$$q-EI(X_q)=E[\max(h_{\min}-\min_{j=1,\cdots,q}Y_j,0)] \tag{8}$$

$$\boldsymbol{Y}=[Y_1\ Y_2\cdots\ Y_q]^{\mathrm{T}}\sim N(\mu,\ \sum\ ) \tag{9}$$

其中

$$Y_j=y(x_i) \tag{10}$$

式中　Y_j——代理模型联合预测值，服从 q 维正态分布

$\boldsymbol{Y}$——代理模型联合预测值矩阵

2.3.3　PEGO－Kriging

建立代理模型后，分别采用 EGO 算法与 PEGO 算法寻求烘焙机结构参数的最优组合，模型流程如图 7 所示。算法在迭代过程中不断加入新采样点以更新代理模型，提升模型精度，更好地寻求最优解。经 EGO 算法迭代后，Kriging 代理模型 R^2 为 0.979 4，RMSE 为 0.091 5 K；经 PEGO 算法迭代后，Kriging

代理模型 R^2 为 1，RMSE 为 0.004 3 K。由此可见，PEGO 算法的模型精度优于 EGO 算法。且本文 PEGO 算法参数 q 取值为 2，即每次迭代输出 2 个新采样点，相较于 EGO 算法迭代速度明显更优。因此，在进行闽北乌龙茶“远红外-炭”烘焙机结构优化与试验时，优先选择 PEGO 算法。

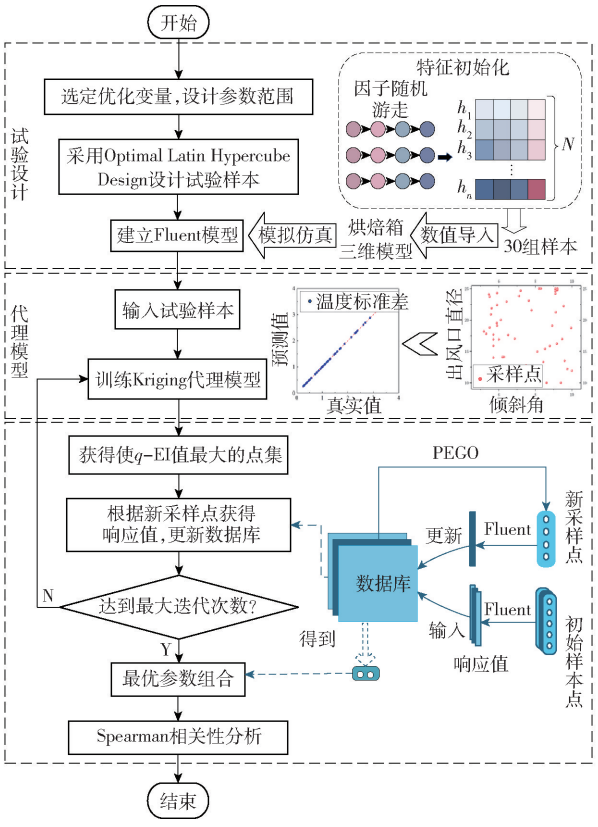


图 7 PEGO－Kriging 模型优化流程

Fig. 7 PEGO－Kriging model optimization flowchart

2.3.4 优化结果分析

Spearman 相关性分析是一种用于衡量 2 个变量之间单调关系强度的非参数统计方法[26]，分析结果如图 8 所示。由图 8 可知，托盘数、排风口孔径和导流板倾斜角对箱体温度标准差影响较为显著，相关系数分别为 -0.83、-0.47、-0.42，均为负相关；侧边梯度孔孔数差值对箱体温度标准差的影响为 -0.017，可忽略。

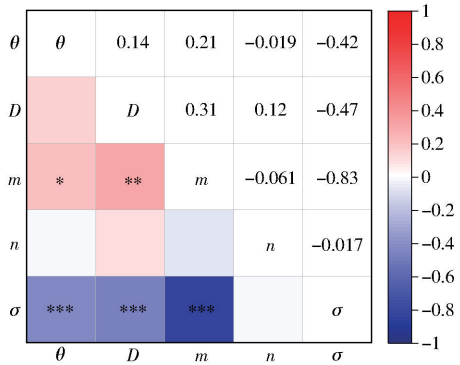


图 8 Spearman 相关性分析结果

Fig. 8 Results of Spearman correlation analysis

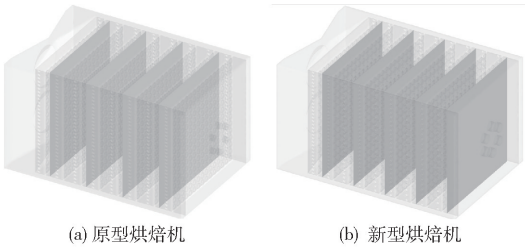
经 PEGO 算法迭代后，得最优响应值为 0.25 K，最优参数组合为：导流板倾斜角 8.3°、排风口孔径 25 mm、托盘数 9 个、侧边梯度孔孔数差值 3 个。烘焙机相较于原型烘焙机箱体温度标准差 1.85 K，优化后箱体温度标准差下降 86.49%，烘焙机内部受热更均匀，烘焙机性能得到有效提升。

3 数值计算结果

3.1 仿真云图

3.1.1 温度仿真云图

为探究烘焙机温控性能提升原因，明确烘焙机内部温度场分布，沿 Y 轴方向均匀选取截面。针对烘焙机托盘个数存在差异，原型烘焙机选取 4 处截面，新型烘焙机选取 5 处截面，如图 9 所示。



(a) 原型烘焙机 (b) 新型烘焙机

图 9 不同烘焙机内部监测面

Fig. 9 Internal inspection surfaces of different baking machines

图 10 为不同烘焙机模型部分茶叶层温度分布云图。由图 10a～10c 可见，炭焙烘焙机呈中部低温特征，远红外烘焙机呈两侧低温特征，而优化前“远红外-炭”烘焙机虽未呈明显低温特征，但箱体温度场仍存在离散度大、分布紊乱问题，无法满足茶叶均匀烘焙需求。由图 10d～10f 可知，各烘焙机茶叶层温差均大幅下降且各层平均温度稳步提升，温度场均匀性有效改善。尤其是优化后“远红外-炭”烘焙机，其局部低温区大幅减小的同时也有效抑制了侧边高温区形成，实现同批次茶叶烘焙品质均匀。

3.1.2 速度仿真云图

为进一步探究烘焙机性能提升原因，明确烘焙机内部流场特性，现沿 Z 轴方向平均选取 3 处截面 $Z=0$、$Z=0.2$ m、$Z=-0.2$ m，烘焙机内部监测面如图 11 所示。

在 CFD 仿真模拟中，速度分布云图是最直观的数据展现方式[27]。图 12 为不同烘焙机模型各监测面速度分布云图。由图 12a～12c 可见，不同烘焙机在优化前低速区占比较大，原因是优化前热空气自进风口进入烘焙机后，在烘焙机箱体左右通风区形成明显涡流，气流流通受阻，产生局部低速区。同时

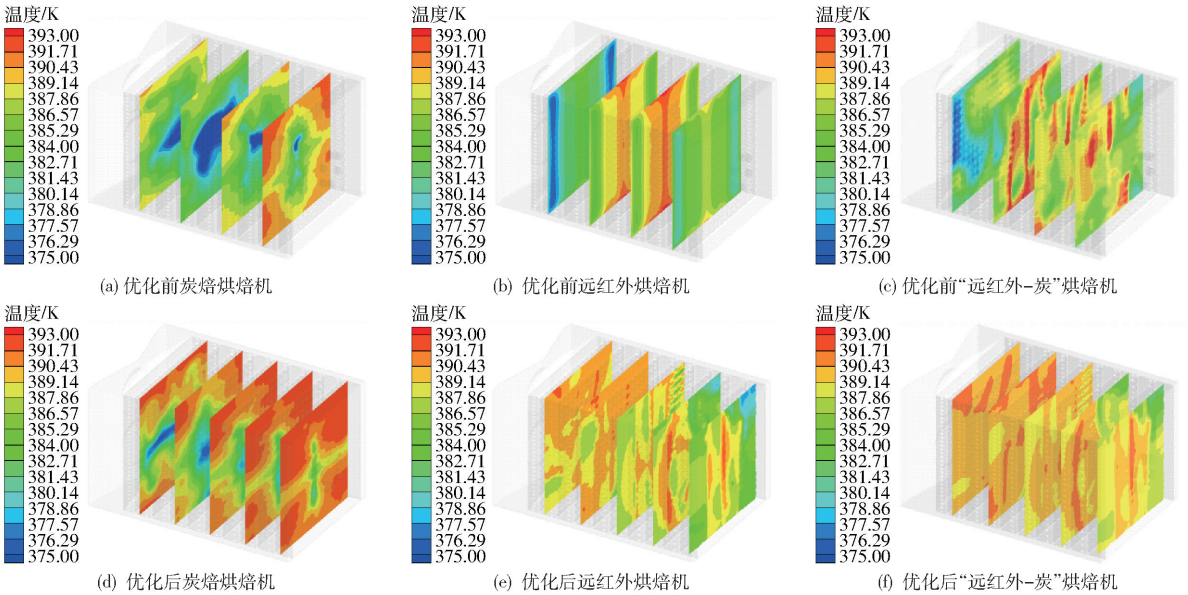


图 10　不同烘焙机优化前后茶叶切面温度云图

Fig. 10　Temperature contour maps of tea leaf cross-sections before and after optimization

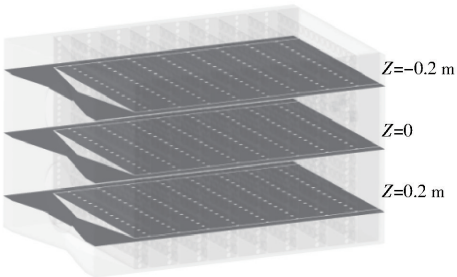


图 11　内部监测面

Fig. 11　Internal monitoring surface

箱体内部空气流动不均导致气体流动速度分布跨度大，流动速度为 0.3 ~ 4 m/s，不利于烘焙脱水。由图 12d、12e 可知，优化后箱体内部各处气流速度得到改善，进口处涡流减小，内部气流增多，茶叶层气流流动速度得到提升，激发茶叶香气，但各监测面速度场显示上下层茶叶速度相差过大。对比图 12f 可知，新型烘焙机进风口处涡流减少，提升烘焙机箱体内整体气流速度，使得箱体内部气流速度普遍处于 1.5 ~ 2 m/s 区间，有利于茶叶烘焙脱水，使烘焙质量得以进一步提升。

速度矢量图可直观展示速度方向性[28]，优化前后烘焙机箱体内部监测面速度矢量如图 13 所示。由图 13a ~ 13c 可以看出，优化前气体在进入烘焙机箱体内部时因空气对流导致上下层气体流量不均，可能会导致上下层茶叶品质不一。由图 13d ~ 13f 可知，优化后箱体内部流场发生较大变化，气体不易形成涡流且气体流线分布均匀，气体流向整体呈现竖直向上分布、气体流速整体提升，有利于提高烘焙效率。

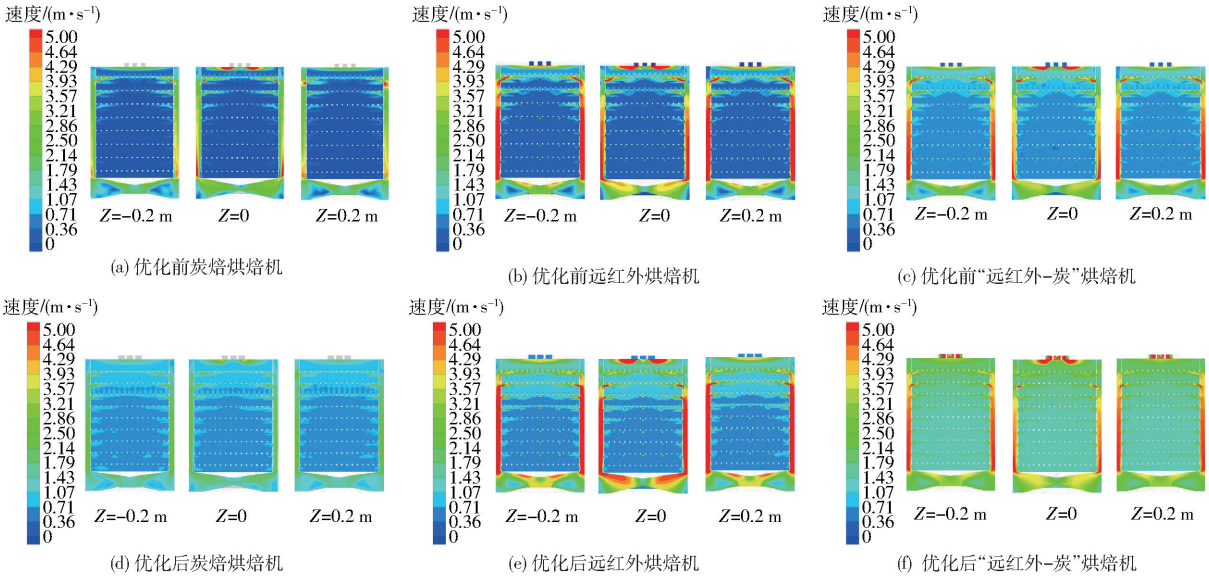
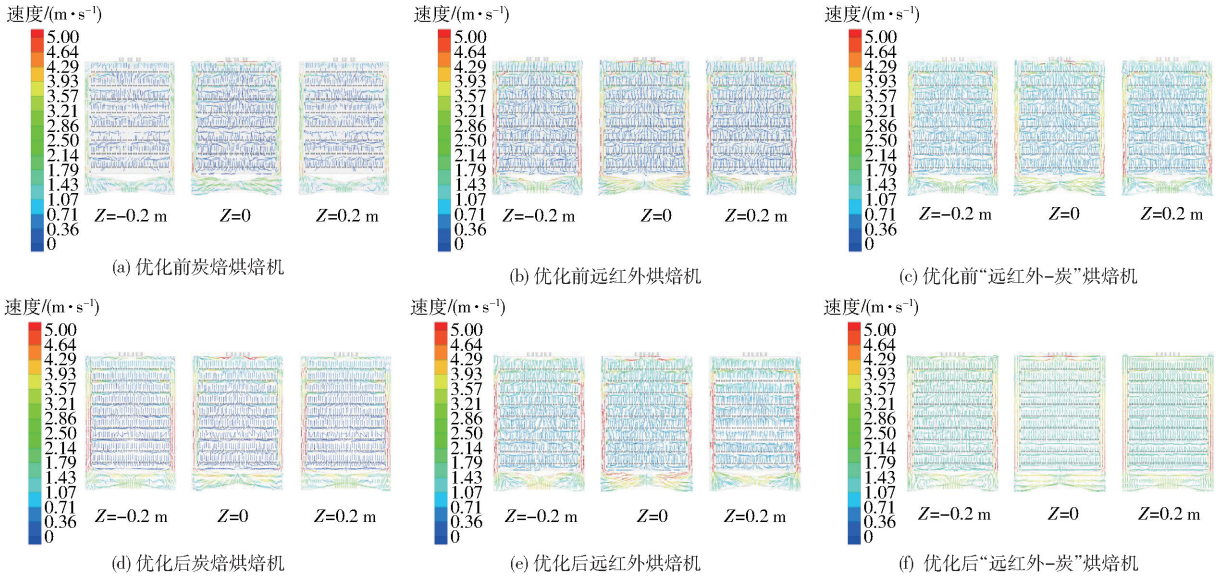


图 12　优化前后各监测面速度云图

Fig. 12　Velocity contour maps of each monitoring surface before and after optimization



(a) 优化前炭焙烘焙机 (b) 优化前远红外烘焙机 (c) 优化前“远红外-炭”烘焙机

(d) 优化后炭焙烘焙机 (e) 优化后远红外烘焙机 (f) 优化后“远红外-炭”烘焙机

图 13 优化前后各监测面速度矢量图

Fig. 13 Velocity vector diagrams for each monitoring surface before and after optimization

3.2 烘焙机流场均匀性分析

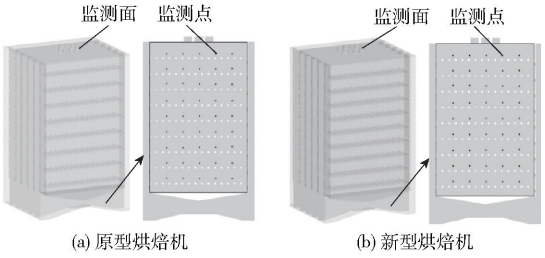
为进一步对闽北乌龙茶烘焙机流场均匀性进行量化分析,通过计算各截面监测点温度相对标准偏差CV_T与各截面速度相对标准偏差CV_V。温度相对标准偏差主要反映烘焙机内部不同位置温度波动。速度相对标准偏差主要反映烘焙机箱体内部气流流动速度。故通过监测烘焙机箱体内部温度相对标准偏差与速度标准偏差验证烘焙机内部流场均匀性,计算式为

$$CV = \frac{L}{\overline{X}} \times 100\% \tag{11}$$

式中 L——标准偏差

$\overline{X}$——所有监测点平均值

通过比较不同工况下 CV 值评判截面上流场均匀度,CV 值越小,流场均匀度越高[29]。沿烘焙机 Z 轴方向均匀截取 5 个 XY 截面,每个截面布置 25 个监测点,以全面反映工作区间内的流场分布情况[30],监测面与监测点具体分布如图 14 所示。



(a) 原型烘焙机 (b) 新型烘焙机

图 14 监测面与监测点分布图

Fig. 14 Distribution map of monitoring surfaces and monitoring points

计算各截面温度相对标准偏差CV_T和速度相对标准偏差CV_V,结果如图 15 所示。由图 15 可知,新型烘焙机各截面CV_T与CV_V较优化前均有显著降低,温度标准偏差最低值达 0.003,最大降幅达 73%;速度标准偏差最低值为 0.63,最大降幅为 43%。表明新型烘焙箱内部流场分布更均匀,可提升乌龙茶烘焙品质一致性。

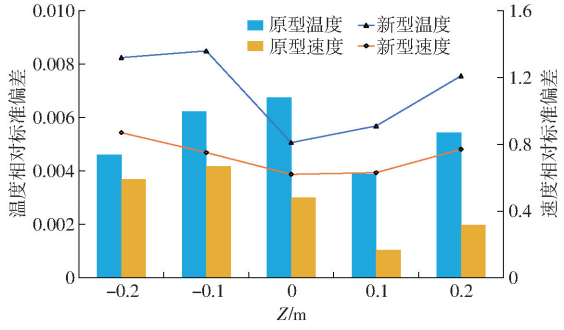


图 15 相对标准偏差

Fig. 15 Relative standard deviation

4 试验验证

根据最优参数组合进行样机制作并开展试验。闽北乌龙茶新型烘焙机样机如图 16 所示。2025 年 10 月在武夷山香江茶业有限公司以肉桂茶叶为例开展烘焙效果对比试验,设置红外加热管温度为 393 K,加热时长为 1 h。

4.1 温度均匀性测试试验

采用温度传感器测量闽北乌龙茶新型烘焙机箱体温度,共进行 5 次试验,试验结果如表 2 所示。结果表明,新型烘焙机温度标准差相对炭焙烘焙机与原型烘焙机分别下降 90.81% 和 85.24%,提升箱体内部各层温度均匀性。

4.2 闽北乌龙茶烘焙含水率试验

根据 GB/T 8304—2013《茶水分测定》测定茶叶含水率,烘焙前对样品含水率进行 5 次测定,含水

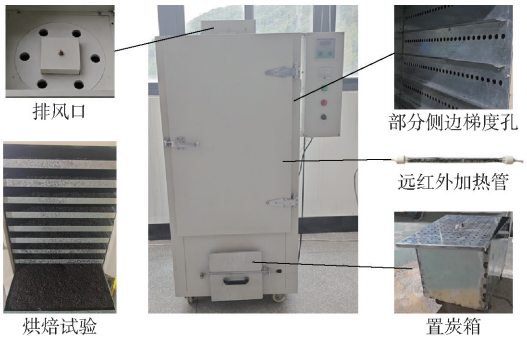


图 16　试验样机

Fig. 16　Prototype diagram

表 2　烘焙机各层温度测定结果

Tab. 2　Determination results of temperature at each layer of baking machine　K

烘焙机层数	烘焙机型		
	炭焙	原型	新型
1	380. 57	383. 24	390. 63
2	381. 45	385. 71	390. 34
3	383. 92	387. 72	390. 25
4	385. 03	389. 00	389. 92
5	385. 74	390. 50	390. 41
6	387. 62	387. 33	390. 91
7	389. 21	387. 13	390. 17
8	390. 18	386. 92	390. 45
9			389. 93
标准差	3. 47	2. 15	0. 32

率分别为 5. 35%、5. 83%、5. 57%、5. 22%、5. 90%，平均值为 5. 57%。对不同机型闽北乌龙茶烘焙机茶叶含水率进行测定，结果如表 3 所示。

表 3　茶叶含水率测定结果

Tab. 3　Determination results of moisture content in tea leaves　%

试验序号	烘焙机型		
	炭焙	原型	新型
1	4. 89	4. 96	4. 05
2	4. 70	4. 51	3. 97
3	4. 67	4. 23	4. 11
4	4. 55	4. 73	3. 85
5	4. 94	4. 02	3. 69
平均值	4. 75	4. 50	3. 88

由表 3 可知，新型烘焙机茶叶含水率相对炭焙烘焙机下降 18. 31%，相对原型烘焙机下降 13. 78%，去湿效果得到有效提升。

4. 3　感官审评

根据 GB/T 23776—2018《茶叶感官审评方法》对不同机型加工的武夷岩茶进行感官审评，审评总得分计算式为

$$I = 0.2A + 0.05B + 0.3C + 0.35E + 0.1P \quad (12)$$

式中　I——审评总得分

A、B、C、E、P——品质因子，即分别为外形、汤色、香气、滋味、叶底审评得分

抽取第 1、3、5 次试验所得茶叶进行感官审评打分，结果如表 4 所示。由表 4 可知，闽北乌龙茶新型烘焙机感官审评得分（90. 2）高于原型烘焙机与炭焙烘焙机，烘焙效果得到有效提升。

表 4　茶叶感官审评得分

Tab. 4　Sensory evaluation scores for tea

品质因子	炭焙			原型			新型		
	第 1 次	第 3 次	第 5 次	第 1 次	第 3 次	第 5 次	第 1 次	第 3 次	第 5 次
外形	80. 0	79. 0	82. 0	86. 0	88. 0	85. 0	90. 0	91. 0	91. 0
汤色	78. 0	80. 0	79. 0	84. 0	86. 0	83. 0	88. 0	89. 0	87. 0
香气	82. 0	81. 0	81. 0	87. 0	85. 0	84. 0	89. 0	90. 0	91. 0
滋味	83. 0	82. 0	80. 0	86. 0	84. 0	87. 0	92. 0	90. 0	89. 0
叶底	79. 0	80. 0	78. 0	85. 0	87. 0	88. 0	90. 0	89. 0	92. 0
总得分	81. 5	80. 8	80. 5	86. 1	85. 5	85. 6	90. 3	90. 1	90. 2
平均值		80. 9			85. 7			90. 2	

5　结论

（1）基于最优拉丁超立方设计所得的 30 组试验方案，采用 Fluent 流体仿真构建样本数据集。利用样本数据集构建 Kriging 代理模型，通过 PEGO 算法迭代不断更新代理模型并求得最优参数组合：导流板倾斜角 8. 3°、排风口孔径 25 mm、托盘数 9 个、侧边梯度孔孔数差值 3 个，最优箱体温度标准差为 0. 25 K。

（2）对闽北乌龙茶新型烘焙机进行 Spearman 相关性分析可知，托盘数与箱体温度标准差相关系数为 －0. 83，达到高相关程度，且呈负相关趋势；排风口孔径和导流板倾斜角度对箱体温度标准差的影响相差无几，分别为 －0. 47 和 －0. 42；侧边梯度孔孔数差值对箱体温度标准差的影响为 －0. 017，影响较小。

(3)通过 CFD 数值模拟分析优化前后各茶叶层的温度分布,结果表明新型烘焙机内部温度场更加均匀,箱体温度标准差下降 86.49%。通过验证试验对比分析可知,烘焙机各层温度标准差下降 85.24%,叶片含水率下降 13.78%,茶叶感官审评得分平均值达 90.2。入口处涡流强度显著降低,整体结构更符合气流流动规律,有效提升了烘焙均匀性及茶叶品质。

参 考 文 献

[1] 洪永聪, 卢莉, 辛伟, 等. 武夷岩茶“十大名丛”种质生物学特性的鉴定与评价[J]. 中国农学通报, 2012, 28(28): 234 – 238.
Hong Yongcong, Lu Li, Xin Wei, et al. Appraisal and evaluation of biological characteristics of ‘tenfamouscong’ germplasms of Wuyi rock tea[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012,28(28): 234 – 238. (in Chinese)

[2] Wang S, Zhang R, Sun L, et al. Uncovering the key miRNA-target network of tea plants in resistance to sooty mold disease [J]. BMC Plant Biology, 2025, 25(1): 446.

[3] 占鑫怡, 欧晓西, 张雯萍, 等. 不同烘焙程度“春闺”闽北乌龙茶风味品质分析[J]. 食品工业科技, 2024, 45(10): 242 – 253.
Zhan Xinyi, Ou Xiaoxi, Zhang Wenping, et al. Analysis of flavor quality of ‘chungui’ Minbei Oolong-tea with different baking degrees[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(10): 242 – 253. (in Chinese)

[4] 高育森, 任金波, 林婷, 等. 响应面法优化高品质茶叶木炭烘焙参数[J]. 福建农业学报, 2024, 39(2): 225 – 236.
Gao Yusen, Ren Jinbo, Lin Ting, et al. Response surface-optimized tea charcoal baking[J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2024, 39(2): 225 – 236. (in Chinese)

[5] 项应萍, 徐邢燕, 刘国英, 等. 闽北乌龙茶烘焙技术研究进展[J]. 亚热带农业研究, 2019, 15(3): 211 – 216.
Xiang Yingping, Xu Xingyan, Liu Guoying, et al. Research progress on roasting technology of Wulong tea in Northern Fujian [J]. Subtropical Agriculture Research, 2019, 15(3): 211 – 216. (in Chinese)

[6] 张开兴, 王文中, 赵秀艳, 等. 滚筒式茶叶热风复干机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(5): 377 – 386.
Zhang Kaixing, Wang Wenzhong, Zhao Xiuyan, et al. Design and experiment of drum-type hot air redryer for tea [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(5): 377 – 386. (in Chinese)

[7] 林荣川, 林河通, 林清矫. 采用交叉补偿解耦的乌龙茶自动烘焙机温湿度模糊控制[J]. 农业工程学报, 2012, 28(20): 80 – 87.
Lin Rongchuan, Lin Hetong, Lin Qingjiao. Fuzzy control of temperature and humidity of Oolong-tea automatic roaster based on cross-compensation decoupling[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(20): 80 – 87. (in Chinese)

[8] Yuzo M, Yusuke S, Yuichi Y. Changes in the concentrations of acrylamide, selected odorants, and catechins caused by roasting of green tea[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2008, 56(6): 2154 – 2159.

[9] 高育森, 任金波, 李梅娟, 等. 基于模糊 PID 控制的茶叶炭焙烘焙机设计与试验[J]. 食品与机械, 2021, 37(3): 96 – 101.
Gao Yusen, Ren Jinbo, Li Meijuan, et al. Design and test of tea charcoal roasting machine based on fuzzy PID control[J]. Journal of Food and Machinery, 2021, 37(3): 96 – 101. (in Chinese)

[10] 邓余良, 尹军峰, 许勇泉, 等. 恒温远红外提香技术在绿茶加工中的应用研究[J]. 茶叶科学, 2013, 33(4): 336 – 344.
Deng Yuliang, Yin Junfeng, Xu Yongquan, et al. Application research of calm-holding temperature-far infrared technology for green tea processing[J]. Tea Science, 2013, 33(4): 336 – 344. (in Chinese)

[11] 刘鑫, 吴青锋, 杨文广. 基于自适应 Kriging 代理模型的工程机械结构优化设计方法[J]. 工程设计学报, 2025, 32(6): 735 – 744.
Liu Xin, Wu Qingfeng, Yang Wenguang. Optimization design method for construction machinery structure based on adaptive Kriging surrogate model[J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2025, 32(6): 735 – 744. (in Chinese)

[12] 钱睿, 吴达科, 杨明金. 基于 Fluent 的棉花烘房流场均匀性优化[J]. 中国农机化学报, 2023, 44(1): 152 – 161.
Qian Rui, Wu Dake, Yang Mingjin. Optimization of flow field uniformity in cotton drying room based on Fluent[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44(1): 152 – 161. (in Chinese)

[13] 吕汉明, 梁金辉, 马崇启, 等. 热风黏合烘箱有限元仿真分析与结构优化[J]. 纺织学报, 2024, 45(10): 216 – 223.
Lü Hanming, Liang Jinhui, Ma Chongqi, et al. Finite element simulation analysis and structural optimization of hot-air bonding oven based on finite element method[J]. Journal of Textile Research, 2024, 45(10): 216 – 223. (in Chinese)

[14] 康宏彬, 陈锶钦, 胡书旭, 等. 基于 CFD 的黄姜热泵干燥机干燥室热流场分析及结构优化[J]. 中国农机化学报, 2025, 46(3): 133 – 138, 145.
Kang Hongbin, Chen Siqin, Hu Shuxu, et al. CFD-based thermal flow field analysis and structural optimization in the drying chamber of a yellow ginger heat pump dryer[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2025, 46(3): 133 – 138, 145. (in Chinese)

[15] 刘瑞, 董继先, 王栋, 等. 菊花热风烘房的流场模拟及结构优化[J]. 机械设计, 2021, 38(1): 47 – 54.
Liu Rui, Dong Jixian, Wang Dong, et al. Flow-field simulation and structural optimization of the chrysanthemum hot air drying room[J]. Journal of Machine Design, 2021, 38(1): 47 – 54. (in Chinese)

[16] 杨历，陶斌斌. 多孔介质干燥过程传热传质研究[J]. 农业工程学报，2005，21(1)：27－31.
Yang Li，Tao Binbin. Heat and mass transfer for drying process of porous media[J]. Transactions of the CSAE，2005，21(1)：27－31.(in Chinese)

[17] 陈正发，车刚，万霖，等. 稻谷四向通风混流干燥段数值模拟与试验[J]. 农业工程学报，2022，38(24)：237－247.
Chen Zhengfa，Che Gang，Wan Lin，et al. Numerical simulation and experiment of four-way ventilation mixed-flow drying section for rice[J]. Transactions of the CSAE，2022，38(24)：237－247.（in Chinese）

[18] Ruan C，He L，Chen C，et al. Multi-objective optimization of centrifugal fan in a tea roller stirring machine based on bionic blades-response surface methodology[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering，2025，47(5)：243.

[19] 刘鹏，范立云，白云，等. 高速电磁阀电磁力近似模型的构建与分析[J]. 农业工程学报，2015，31(16)：96－101.
Liu Peng，Fan Liyun，Bai Yun，et al. Construction and analysis of an electromagnetic force approximation model for high-speed solenoids[J]. Transactions of the CSAE，2015，31(16)：96－101.（in Chinese）

[20] Jin R，Chen W，Sudjianto A. An efficient algorithm for constructing optimal design of computer experiments[J]. Journal of Statistical Planning and Inference，2004，134(1)：268－287.

[21] Chen X，Yu L，Liu L Y，et al. Multi-objective shape optimization of autonomous underwater vehicle by coupling CFD simulation with genetic algorithm[J]. Ocean Engineering，2023，286：115722.

[22] 高月华，王希诚. 基于 Kriging 代理模型的多点加点序列优化方法[J]. 工程力学，2012，29(4)：90－95.
Gao Yuehua，Wang Xicheng. A sequential optimization method with multi-point sampling criterion based on Kriging surrogate model[J]. Engineering Mechanics，2012，29(4)：90－95.（in Chinese）

[23] Shahriari B，Swersky K，Wang Ziyu，et al. Taking the human out of the loop：a review of Bayesian optimization[J]. Proceedings of the IEEE，2016，104(1)：148－175.

[24] 顾学荣，刘硕士，杨思宇. 基于并行 EGO 和代理模型辅助的多参数优化方法研究[J]. 化工学报，2023，74(3)：1205－1215.
Gu Xuerong，Liu Shuoshi，Yang Siyu. Research on multi-parameter optimization method based on parallel EGO and surrogate-assisted model[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering，2023，74(3)：1205－1215.（in Chinese）

[25] Ginsbourger D，Riche R L，Carraro L. Kriging is well-suited to parallelize optimization[J]. Adaptation Learning and Optimization，2010，2：131－162.

[26] 阮承治，陶齐齐，陈奕玮，等. 武夷岩茶摇青机离心风机优化设计与试验[J]. 农业机械学报，2024，55(12)：480－490.
Ruan Chengzhi，Tao Qiqi，Chen Yiwei，et al. Optimization design and experimental validation of centrifugal fan for Wuyi rock tea shaking machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2024，55(12)：480－490.（in Chinese）

[27] 杨易，王喆，张之远. 流线型构件对 TTU 模型风荷载影响的大涡模拟研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版)，2025，53(2)：136－148.
Yang Yi，Wang Zhe，Zhang Zhiyuan. Large eddy simulation study on the influence of streamlined components on wind loads in TTU models[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)，2025，53(2)：136－148.（in Chinese）

[28] 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 and Machinery，2020，36(10)：81－86.（in Chinese）

[29] 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）

[30] 陈忠加，赵宇轩，卢丰源，等. 蒸汽烫漂与热风干燥箱流场优化设计及仿真[J]. 农业工程学报，2024，40(6)：60－71.
Chen Zhongjia，Zhao Yuxuan，Lu Fengyuan，et al. Flow field optimized design and simulation of steam blanching and hot air drying chamber[J]. Transactions of the CSAE，2024，40(6)：60－71.（in Chinese）