doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.09.064

基于多策略人群搜索算法的全闭式热风循环密集烤房温度双指标优化

段绍米[1,2]　罗会龙[2]　刘海鹏[1]　李耀雯[1]

(1.昆明理工大学信息工程与自动化学院,昆明 650500;
2.昆明理工大学建筑工程学院,昆明 650500)

摘要:针对目前的密集烤房存在的温度分布不均匀、能耗大、烟叶香气淡等不足,设计一种采用全闭式热风循环的烟叶密集烤房,并结合密集烤房烟叶烘烤温度调控的特点,引入温度标准差和温度不均匀度。应用三黑洞系统捕获策略、早熟干扰和随机干扰策略,对人群搜索优化算法(Seeker optimization algorithm, SOA)进行改进,提出了一种多策略人群搜索优化算法(Multi-strategy seeker optimization algorithm, MSSOA)。并应用多策略人群搜索优化算法对全闭式热风循环密集烤房温度控制双指标进行了优化,找到入口热风速度、烟叶孔隙率、分风板角度、烟层间距等烤房最优工艺和结构参数,提升了全闭式热风循环密集烤房温度分布均匀性。

关键词:全闭式热风循环密集烤房;双指标温度控制;多策略;人群搜索优化算法

中图分类号:TK3　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2025)09-0740-11　　**OSID**:

Multi-strategy Seeker Algorithm Optimized Temperature Dual Indicators for Fully Enclosed Hot Air Circulation Bulk Curing Barn

DUAN Shaomi[1,2]　LUO Huilong[2]　LIU Haipeng[1]　LI Yaowen[1]

(1. *Faculty of Information Engineering and Automation*, *Kunming University of Science and Technology*, *Kunming* 650500, *China*
2. *Faculty of Civil Engineering and Mechanics*, *Kunming University of Science and Technology*, *Kunming* 650500, *China*)

Abstract: The design of a fully enclosed tobacco leaf bulk curing barn with hot air circulation in response to issues related to uneven temperature distribution, high energy consumption, and light aroma of tobacco leaves was proposed. For the fully enclosed hot air circulation bulk curing barn, the temperature standard deviation index and temperature inhomogeneity index were introduced in combination with the characteristics of tobacco leaves roasting temperature regulation in the bulk curing barn. Applying the three black hole system capture strategy, premature interference and random interference strategy, the seeker optimization algorithm (SOA) was improved, and a multi-strategy seeker optimization algorithm (MSSOA) was proposed. The multi-strategy seeker optimization algorithm was also applied to optimize the temperature control dual indexes of the fully enclosed hot air circulation bulk curing barn, and the optimal process and structure parameters of the baking room such as the inlet hot air velocity, the tobacco porosity, the angle of the air separation plate, and the spacing of the tobacco layer were found, which improved the uniformity of the temperature distribution of the fully enclosed hot air circulation bulk curing barn.

Key words: fully enclosed hot air circulation bulk curing barn; dual indicator temperature control; multi-strategy; seeker optimization algorithm

收稿日期:2024-04-18　修回日期:2024-08-08

基金项目:国家自然科学基金项目(52166001)、云南省自然科学基金重点项目((202401AS070104)、云南省重大科技专项(202202AE090011)、云南省烟草公司科技项目(2023530000241024)和昆明理工大学校人培项目(KKZ3202403191)

作者简介:段绍米(1981—),女,实验师,博士,主要从事自动控制系统和计算机仿真研究,E-mail:dsm_2005@163.com

通信作者:罗会龙(1972—),男,教授,博士,主要从事建筑节能及暖通空调系统优化设计研究,E-mail:huilongluo@kust.edu.cn

0　引言

密集烤房在现代农业生产中具有广阔的应用前景，烘烤决定烟叶品质和可用性；先进的烘烤设备，是准确实现科学的烘烤工艺、提高烟叶品质、降低劳动强度和生产成本的基础。近年来，国内外学者对密集烤房的研究主要包括：密集烤房的供热系统和保温材料研究[1-3]、装烟方式和经济效益[4-7]、温湿度建模仿真及控制的研究[8-10]。研究虽然取得了一定进展，带来了一些经济效益，但在能耗节约，提高能源利用率，烤后烟叶香度、温湿度及风速分布均匀性等方面还有待进一步研究。

密集型烤房具有装烟多、效率高、易操作、省工、省时等优势[11]。目前，密集烤房已在国内外均得到了较大程度的推广应用[12-14]。但现行的密集烤房温度分布不均匀，且采用开放式排湿方式，将湿气流直接排向室外，导致气流余热的损失，密集烤房供热系统的能量利用率普遍较低[15]，烤后烟叶油分少、香气量降低[16]。

本文对全闭式热风循环密集烤房温度与气流分布进行 CFD[17-21]数值模拟。对全闭式热风循环密集烤房温度采用温度平均值和温度不均匀度进行评定。同时引入人群搜索优化算法（SOA），并改进算法后对烤房工艺和结构参数以温度双指标最小为目标进行优化。其中，对人群搜索优化算法具体改进为：引入三黑洞系统捕获策略、早熟干扰和随机干扰策略，在此基础上提出一种多策略人群搜索优化算法（MSSOA）。并将多策略人群搜索优化算法与人群搜索优化算法对烤房温度双指标控制进行优化比较，找到相对最优的烤房进风速度、孔隙率、分风板角度和烟层间距使烤房温度标准差和温度不均匀度相对最小，以期提升全闭式热风循环密集烤房温度分布均匀性。

1　全闭式热风循环密集烤房温度 CFD 模型

1.1　全闭式热风循环密集烤房工作原理

目前使用的密集烤房采用开放式排湿方式，在烟叶烘烤的排湿阶段，排湿气流直接排向装烟室外。为从根本上避免目前开放式排湿的局限，并进一步提高密集烤房的能量利用率及烟叶品质，提出一种全闭式热风循环密集烤房，其结构如图 1 所示。与开放式排湿密集烤房相比，全闭式热风循环密集烤房取消了排湿口，增设了除湿系统。在烟叶密集烘烤过程中，排湿气流的露点温度高于 40℃。因而，除湿设备可采用非接触式间壁式换热器，以室外空气为冷源，对回风口处的热湿气流进行除湿。

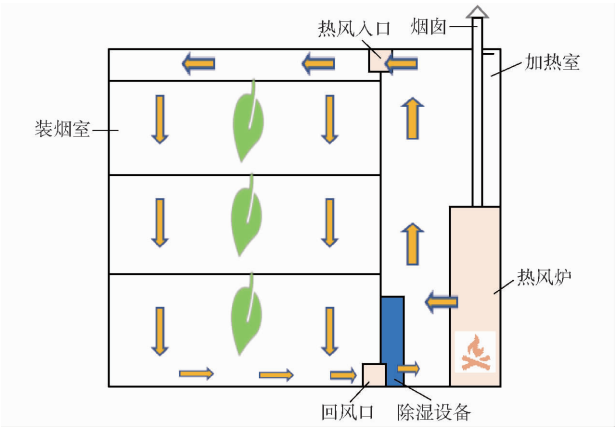


图 1　全闭式热风循环密集烤房工作示意图

Fig. 1　Schematic of fully enclosed hot air circulation bulk curing barn

烟叶密集烘烤时，经热风炉加热后的热风从热风入口送入装烟室。在装烟室中，送入的热风与烟叶进行热湿交换，热空气湿度增加，温度降低，变成低温高湿的热风后从回风口流经除湿设备。低温高湿的热风在除湿设备中除湿后，返回热风炉再次加热后送入装烟室，如此循环往复。

全闭式热风循环密集烤房将烟叶烘烤过程中挥发出的烟叶香气成分及其它有益于提高烟叶烘烤品质的气体成分固定在密集烤房内，从而提高烟叶烘烤质量；并避免现行密集烤房排湿气流余热的损失，以实现烟叶烘烤的节能减排。

1.2　全闭式热风循环密集烤房模拟模型

与目前的密集烤房类似，全闭式热风循环密集烤房分为加热室和装烟室两部分，由隔墙隔开，结构如图 2 所示。全闭式热风循环密集烘烤的原理是：装烟后点燃燃烧器，加热热交换器，利用风机将热风强制通入装烟室内，热风被压入密集隔热的装烟室内，通过烟叶层，加热烟叶带走水分，向下流动。湿热气流经过除湿设备除湿，再被热交换器加热，送入装烟室。如此使热气流在烟叶间循环，带走烟叶排出的水分，直到烟叶被烤干为止[22]。

根据国家散叶烘烤行业标准进行模型建立，烤房为标准气流下降式密集烤房，装烟室长 8 000 mm、宽 2 700 mm、高 3 500 mm，上下层相邻两层烟叶间隙为 100 mm，每层烟叶区域高度为 650 mm，进风口长 2 700 mm、宽 400 mm，出风口长 1 400 mm、宽 400 mm。分风板长 2 700 mm、宽 50 mm，每层烟叶下方设 82 个。本文用 Solidworks 建立模型，并导入 ICEM CFD 中定义边界面，将模型中装烟室大门定义为 door，四周墙壁设置为 wall，内部交界面设置为 interior 面，装烟室模型如图 3 所示。

在 ICEM CFD 中载入建立好的装烟室几何模型，检查几何模型的完整性后进行网格划分，如图 4

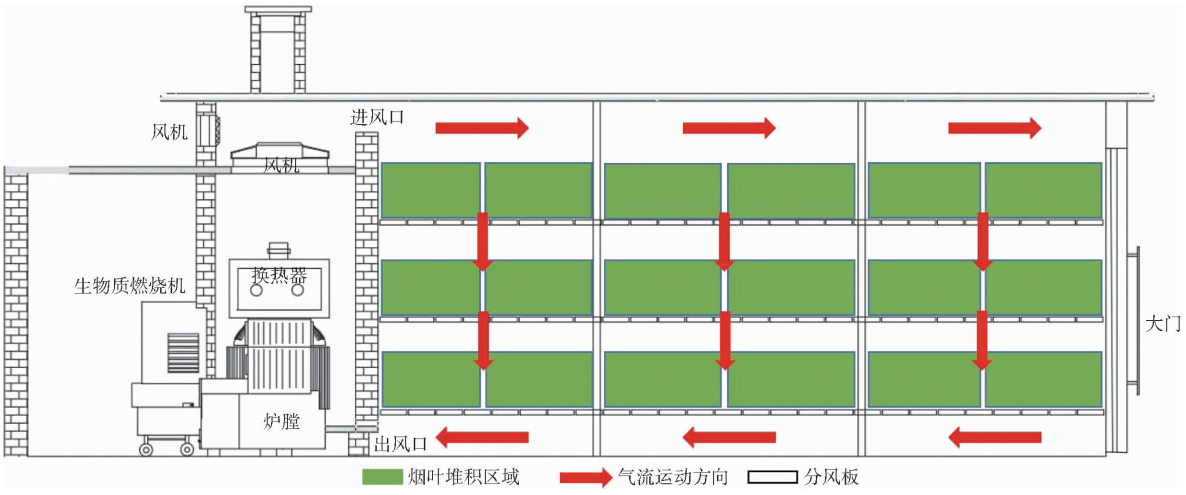


图 2 密集烤房结构示意图

Fig. 2 Tobacco bulk curing barn structure diagram

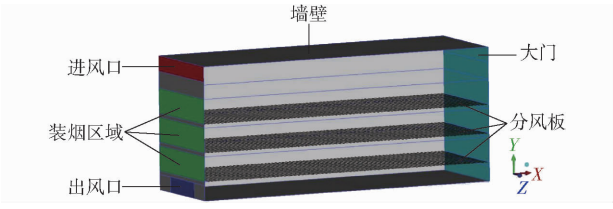


图 3 装烟室模型图

Fig. 3 Model of tobacco bulk curing barn

所示。采用混合网格划分,两种网格的交界面设置一个 interface 面进行数据传输,在装烟室上部区域为纯流体区域,采用结构化网格;分风板采用非结构化网格,将全局网格尺寸最大值设置为 50 mm,网格数量为 5.5×10^5,平均网格质量为 0.78,最小网格质量为 0.27,质量 0.9 以上的网格占比约 47%,且网格无负体积,满足模拟精度要求。

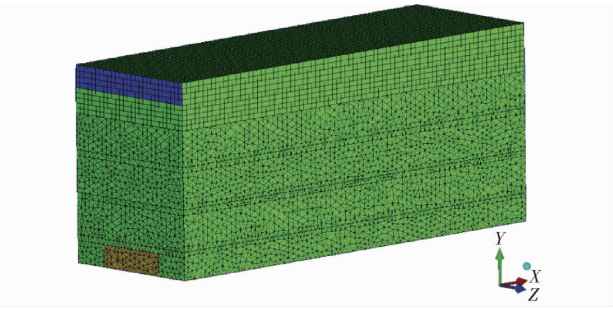


图 4 装烟室网格划分

Fig. 4 Grid division of tobacco bulk curing barn

1.3 CFD 模型方程

装烟室内热湿传递及气流组织的数学模型包括质量守恒方程、动量守恒方程、能量守恒方程、湍流方程[23-25]。

1.4 CFD 模拟模型设置

(1)入口边界条件

本文边界条件设置为速度入口边界,其湍流参数选用湍流强度 I 以及水力直径 D_H,计算式为

$$I=0.16Re^{-\frac{1}{8}}\times100\% \tag{1}$$

$$D_H=4A\frac{1}{P_w} \tag{2}$$

式中 Re——雷诺数 P_w——湿周,m

A——面积,m^2

由于进风口温度随时间变化,因此将入口温度根据标准烘烤工艺温度曲线(图 5),编写为一个时变的 UDF 函数,温度单位为 K。

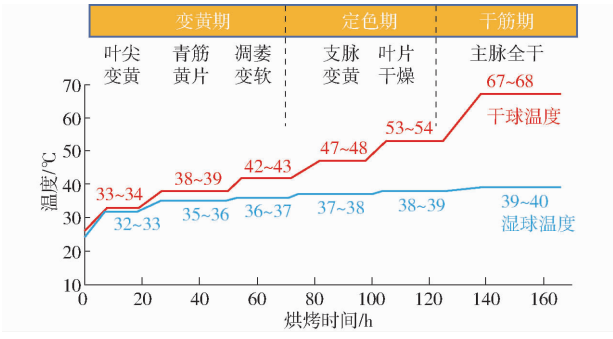


图 5 烘烤工艺曲线

Fig. 5 Baking process curve

(2)出口及壁面边界条件

将出风口设置为 pressure-outlet,湍流参数类型同样选用湍流强度 I 以及水力直径 D_H,并将出口大气压设置为外界大气压,即一个标准大气压,出口温度即为周围环境温度。

不同类型边界条件及材料参数见表 1、2。根据模拟精度要求,收敛设置如下:将残差设置为 0.000 01,时间步长为 60 s,能量残差监视曲线小于 1×10^{-6},迭代残差小于 1×10^{-3},视为计算收敛。

(3)装烟室 CFD 监测点设置

为了能全面监测烤房中的情况,在模拟模型中采用均匀分布的方式对 3 层烟叶上中下前后共设置 27 个监控点,可用来监控各个位置监控点温度、相对湿度、压力、风速等随着烘烤时间变化的规律。

表 1　边界条件设置参数

Tab. 1　Setting parameters of boundary conditions

边界定义	边界条件	参数	数值
进风口	速度入口边界	速度/(m·s^{-1})	4(水平方向)
		温度	UDF 时变函数
		湍流强度/%	3.40
		水力直径/m	0.67
		相对湿度/%	0
出风口	压力出口边界	初始环境温度/K	299
		环境大气压(云南)/Pa	8 104
		出口压力/Pa	0
		湍流强度/%	3.40
		水力直径/m	0.62

表 2　材料属性及相关参数

Tab. 2　Material properties and related parameters

类型	材料	密度/(kg·m^{-3})	比热容/(J·kg^{-1}·K^{-1})	导热系数/(W·m^{-1}·K^{-1})
流体	热空气	1.225	1 006	0.024
多孔介质	烟叶	1 450	3 500	0.086
壁面	24 号砖墙	2 000	2.05	1 005
	铁门	7 870	460	80
	分风板(木板)	700	2 310	0.173

监测点设置如图 6 所示。具体对应坐标(单位:m)位置为①(1.5, 0.4, 0.85)、②(4, 0.4, 0.85)、③(6.5, 0.4, 0.85)、④(1.5, 0.4, 1.75)、⑤(4, 0.4, 1.75)、⑥(6.5, 0.4, 1.75)、⑦(1.5, 0.4, 2.65)、⑧(4, 0.4, 2.65)、⑨(6.5, 0.4, 2.65)、⑩(1.5, 1.35, 0.85)、⑪(4, 1.35, 0.85)、⑫(6.5, 1.35, 0.85)、⑬(1.5, 1.35, 1.75)、⑭(4, 1.35, 1.75)、⑮(6.5, 1.35, 1.75)、⑯(1.5, 1.35, 2.65)、⑰(4, 1.35, 2.65)、⑱(6.5, 1.35, 2.65)、⑲(1.5, 2.3, 0.85)、⑳(4, 2.3, 0.85)、㉑(6.5, 2.3, 0.85)、㉒(1.5, 2.3, 1.75)、㉓(4, 2.3, 1.75)、㉔(6.5, 2.3, 1.75)、㉕(1.5, 2.3, 2.65)、㉖(4, 2.3, 2.65)、㉗(6.5, 2.3, 2.65)。

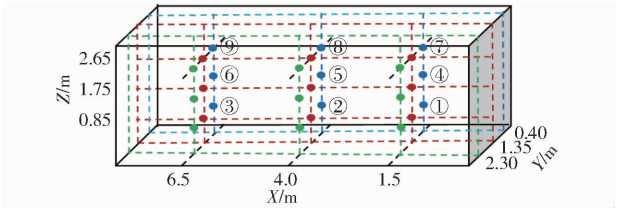


图 6　模拟模型监测点设置位置图

Fig. 6　Location diagram of monitoring points in simulation model

2　双指标优化控制系统设计

2.1　控制原理

本文双指标控制是指不以单一的某个指标为控制目的,考虑两个方面因素制定两个指标的控制策略。烤房温度双指标控制包括温度标准差和温度不均匀度。对烤房温度控制的双指标进行描述,并给出了烟叶烘烤中变黄期、定色期和干筋期部分保温时段的不同工艺参数下烤房温度控制双指标评价模型图。

2.1.1　烤房温度控制双指标描述

(1)温度标准差

标准差反映检测点值与标准值的离差程度,以及数列平均水平的高低;采用该层温度点集合标准差来描述烤房温度标准差 J_1。

(2)温度不均匀度

温度不均匀度反映烤房中同一平面不同区域的温度差异,采用该层温度点集合差值比来描述烤房温度不均匀度,即

$$J_2 = \sum_{j=1}^{m} \beta_j \frac{\max(T_j) - \min(T_j)}{\max(T_j)} \tag{3}$$

式中　J_2——温度不均匀度,表征该层温度分布区域性差异

T_j——第 j 层中的所有被测点温度

m——选取的温度层数,取 3

β_j——第 j 层指标在不均匀度 J_2 中的权重

(3)烤房温度

经过前面分析,烤房温度优化问题可以描述为

$$\begin{cases} \min J = P_1 J_1 + P_2 J_2 \\ \text{s.t.} \begin{cases} v \in [3\ \text{m/s}, 6\ \text{m/s}] \\ d \in [50\ \text{mm}, 350\ \text{mm}] \\ \rho \in [0.6, 0.9] \\ \omega \in [30°, 90°] \end{cases} \end{cases} \tag{4}$$

式中　J——温度评价总指标,K

P_1——温度标准差权重

P_2——温度不均匀度权重

v——烤房热风入口风速,m/s

ρ——烤房里烟叶孔隙率

d——烤房里烟层间距,mm

ω——烤房内分风板角度,(°)

2.1.2　烤房各时段温度控制双指标评价模型

由于试验条件的限制,仅从不同进风速度、孔隙率、分风板角度、烟层间距等工艺和结构参数对全闭式热风循环密集烤房温度场的影响进行模拟,并根据标准密集烤房进风速度、孔隙率、分风板角度、烟层间距的参数设置在其附近均匀设置试验参数。

标准密集烤房进风口风速通常设置为 4 m/s,孔隙率为 0.8,之前的标准密集烤房大部分没有分风板,目前部分烤房安装了分风板,角度为 45°,烟

层间距为 150 mm 左右。为了找到更合适的全闭式热风循环密集烤房进风口风速、孔隙率、分风板角度和烟层间距,本文通过经验测试在标准密集烤房进风口风速 4 m/s 左右以 1 m/s 的差距,设定不同进风口风速 v:2、3、4、5、6 m/s;孔隙率 0.8 左右以 0.1 的差距,设定不同的孔隙率 ρ:0.6、0.7、0.8、0.9;分风板角度 45°左右以 15°或 30°的差距,设定不同分风板角度 ω:30°、45°、60°、90°;烟层间距 150 mm 左右以 100 mm 的差距,设定不同烟层间距 d:50、150、250、350 mm。根据这些不同的参数,分别对全闭式热风循环密集烤房温度分布进行数值模拟仿真,并记录下烤房各监测点随时间变化的温度。根据这些温度建立各时段温度控制双指标评价模型。

(1)烤房变黄期 27 ~ 50 h 时段温度控制双指标评价模型

烤房变黄期保温 27 ~ 50 h 时段不同热风进口速度、孔隙率、分风板角度和烟层间距等工艺参数下烤房各层烟叶温度标准差如图 7 所示。

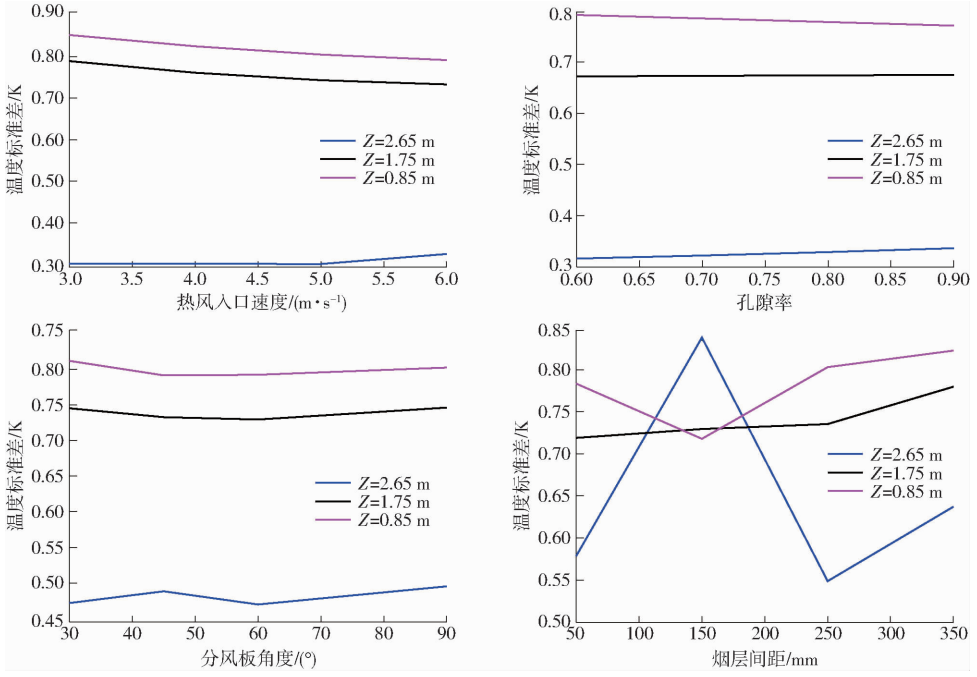


图 7 变黄期保温 27 ~ 50 h 时段不同工艺参数下烤房各层烟叶温度标准差

Fig. 7 Standard deviation index of tobacco leaf temperature of each layer in curing room under different process parameters during period of 27 ~ 50 h in yellowing stage

从图 7 可以看出,在烤房变黄期保温 27 ~ 50 h 时段不同热风进口速度和孔隙率工艺参数下烤房下层和中层的烟叶温度标准差相对较大;不同分风板角度和烟层间距对上层烟叶温度标准差影响较大。

烤房变黄期保温 27 ~ 50 h 时段不同热风进口速度、孔隙率、分风板角度和烟层间距等工艺参数下烤房各层烟叶温度不均匀度如图 8 所示。

从图 8 可以看出,在烤房变黄期保温 27 ~ 50 h 时段不同热风进口速度和孔隙率工艺参数下烤房上层烟叶温度不均匀度相对较大;不同的分风板角度对上、下层烟叶温度不均匀度影响较大;不同的烟层间距对上层烟叶温度不均匀度影响较大,中层烟叶次之,下层烟叶较小。

(2)烤房定色期 105 ~ 125 h 时段温度双指标评价模型

烤房定色期保温 105 ~ 125 h 时段不同热风进口速度、孔隙率、分风板角度和烟层间距等工艺参数下烤房各层烟叶温度标准差如图 9 所示。

从图 9 可以看出,在烤房定色期保温 105 ~ 125 h 时段不同热风进口速度、孔隙率、分风板角度和烟层间距等工艺参数下烤房上层的烟叶温度标准差相对较大;对中、下层烟叶的温度标准差影响次之。

烤房定色期保温 105 ~ 125 h 时段不同热风进口速度、孔隙率、分风板角度和烟层间距等工艺参数下烤房各层烟叶温度不均匀度如图 10 所示。

从图 10 可以看出,在烤房定色期保温 105 ~ 125 h 时段不同热风进口速度和孔隙率工艺参数下烤房上层的烟叶温度不均匀度相对较大;不同分风板角度对下层烟叶的温度不均匀度影响较大,上层烟叶次之,中层烟叶较小;不同的烟层间距对上层烟叶温度不均匀度影响较大,中层烟叶次之,下层烟叶较小。

(3)烤房干筋期 138 ~ 166 h 时段温度双指标评价模型

烤房干筋期保温 138 ~ 166 h 时段不同热风进口速度、孔隙率、分风板角度和烟层间距等工艺参数

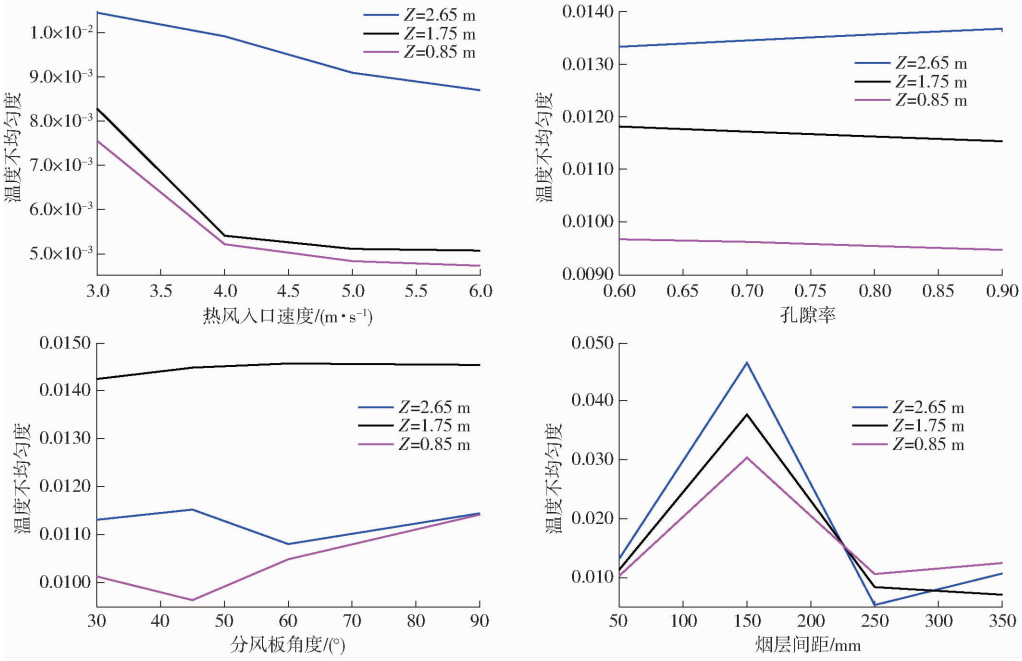


图 8　变黄期保温 27 ~ 50 h 时段不同工艺参数下烤房各层烟叶温度不均匀度

Fig. 8　Temperature heterogeneity index of each layer of tobacco leaves in curing room under different process parameters during period of 27 ~ 50 h during yellowing stage

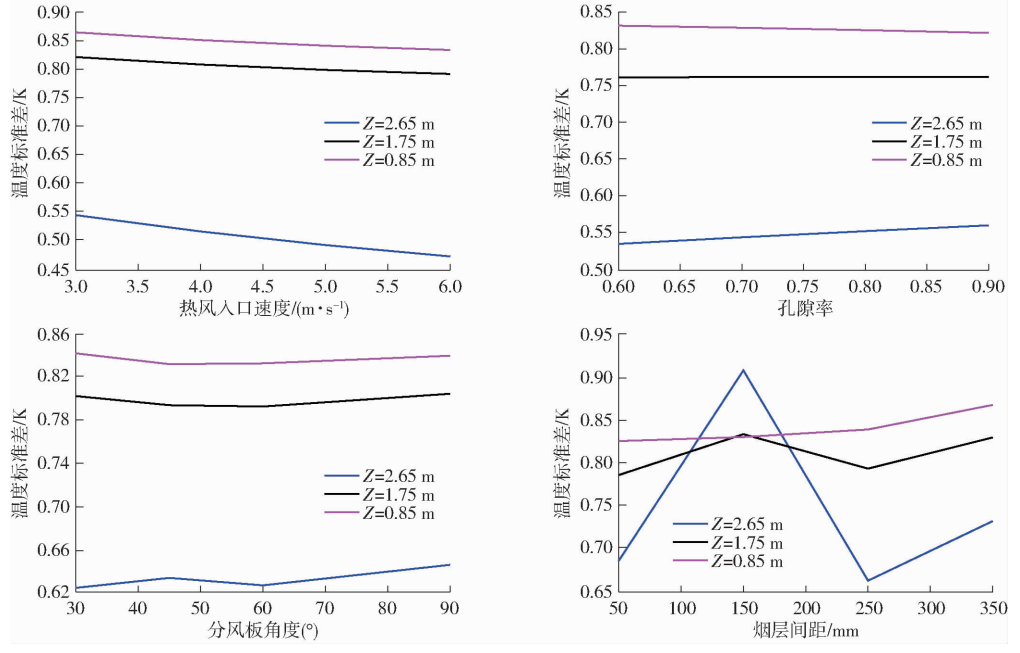


图 9　定色期保温 105 ~ 125 h 时段不同工艺参数下烤房各层烟叶温度标准差

Fig. 9　Standard deviation index of tobacco leaf temperature of each layer in curing room under different process parameters during period of 105 ~ 125 h in color fixation stage

下烤房各层烟叶温度标准差如图 11 所示。

从图 11 可以看出，在烤房干筋期保温 138 ~ 166 h 时段不同热风进口速度、孔隙率、分风板角度和烟层间距等工艺参数下烤房上层的烟叶温度标准差相对较大。

烤房干筋期保温 138 ~ 166 h 时段不同热风进口速度、孔隙率、分风板角度和烟层间距等工艺参数下烤房各层烟叶温度不均匀度如图 12 所示。

从图 12 可以看出，在烤房干筋期保温 138 ~ 166 h 时段不同热风进口速度和孔隙率工艺参数下烤房上层的烟叶温度不均匀度相对较大；不同的分风板角度对中层烟叶的温度不均匀度影响较大；不同的烟层间距对上层烟叶的温度不均匀度影响较大，中层烟叶次之，下层烟叶较小。

2.2　烤房温度双指标体系设计

SOA 是由 DAI 等[26]提出的一种受自然启发的

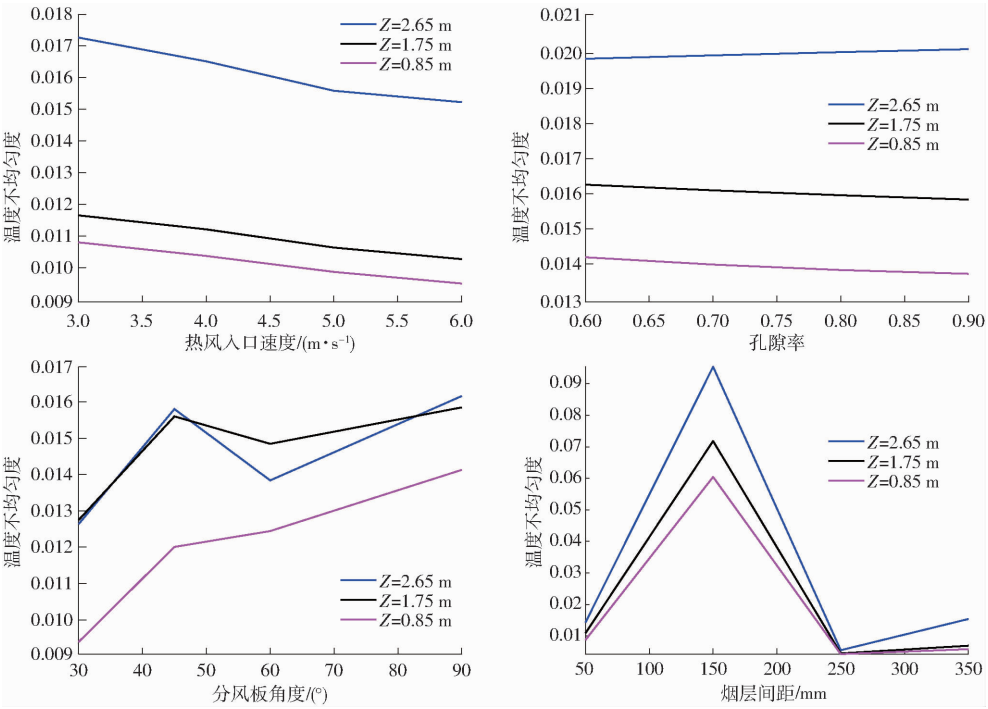


图 10 定色期保温 105 ~ 125 h 时段不同工艺参数下烤房各层烟叶温度不均匀度

Fig. 10 Temperature heterogeneity index of each layer of tobacco leaves in curing room under different process parameters during period of 105 ~ 125 h during color fixation stage

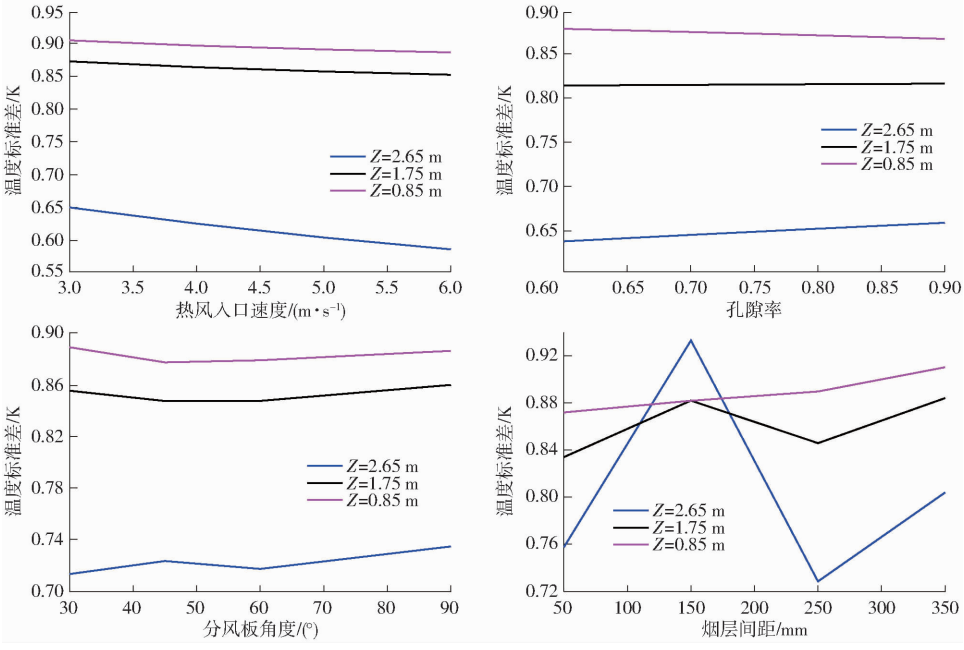


图 11 干筋期保温 138 ~ 166 h 时段不同工艺参数下烤房各层烟叶温度标准差

Fig. 11 Standard deviation index of tobacco leaf temperature of each layer in curing room under different process parameters during period of 138 ~ 166 h in drying stage

新算法。该算法模拟了人群搜索的行为及其信息交换方式,解决了一些实际优化问题。SOA 算法在求解优化问题的早期阶段,收敛速度快,但是,在求解优化问题的后期,当所有个体都接近最优时,会导致种群丧失多样性,在寻找最优解时容易陷入局部最优。

2.2.1 烤房温度指标控制人群搜索算法及改进

为了 SOA 算法在对烤房温度指标优化得到相对最优值,不陷入局部最优,对 SOA 算法进行改进,提出了一种对部分个体进行三黑洞系统捕获策略、多重随机干扰策略和早熟干扰策略共同进化的多策略人群搜索优化算法(MSSOA)。

(1)三黑洞系统捕获策略

在宇宙星系合并的过程中,会产生多个二重黑洞系统。如果这个二重黑洞系统的寿命足够长,它

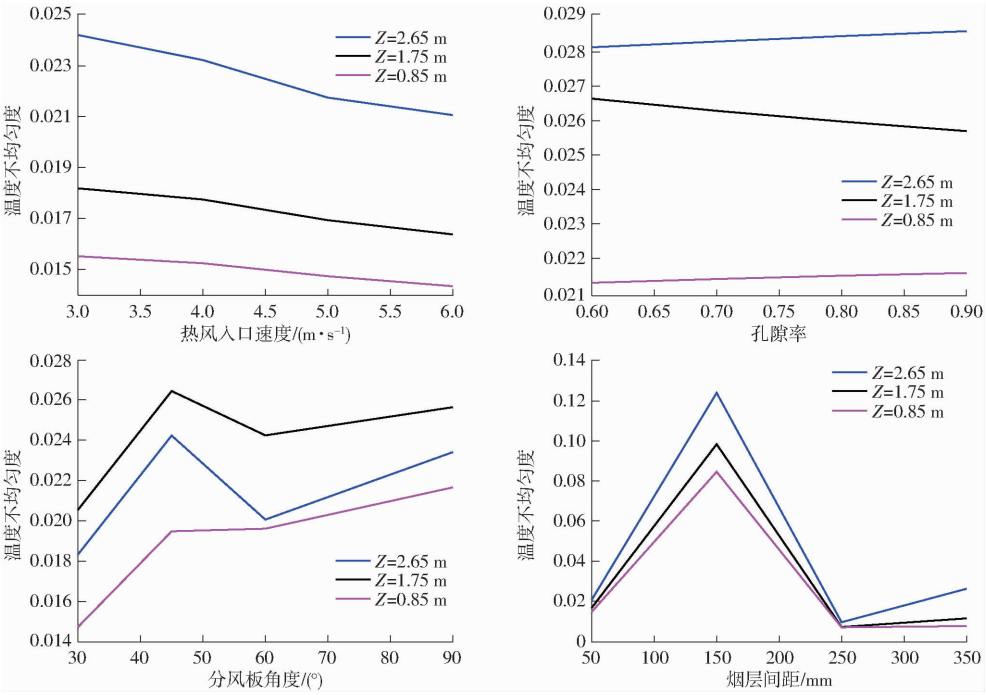


图 12　干筋期保温 138 ~ 166 h 时段不同工艺参数下烤房各层烟叶温度不均匀度

Fig. 12　Temperature heterogeneity index of each layer of tobacco leaves in curing room under different process parameters during period of 138 ~ 166 h during drying stage

将与其它星系合并，就会形成一个三重黑洞系统。3 个黑洞相互作用，由于引力作用，粒子存在有一定的概率被黑洞系统捕获[27-28]。受此启发，引入三黑洞系统粒子捕获机制，应用到人群搜索优化算法中，增强了算法全局搜索能力。

如图 13 所示，设阈值常数 $p \in [0,1]$ 为粒子 x_i 被三重黑洞系统捕获的概率。对于每个粒子 x_i，在每次迭代中生成一个随机数 $l \in [0,1]$。当 $l \leqslant p$ 时，x_i 被三重黑洞系统捕获；否则，按原来的方式更新。

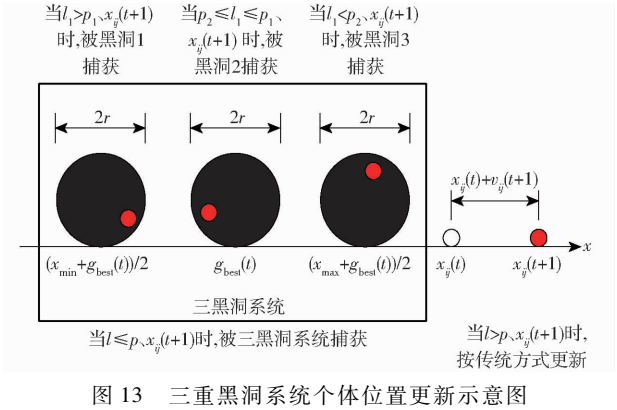


图 13　三重黑洞系统个体位置更新示意图

Fig. 13　Schematic of seeker position update in a triple black hole system

如果 x_i 被三重黑洞系统捕获，则分别以 g_{best}、$(g_{best}+x_{max})/2$ 和 $(g_{best}+x_{min})/2$ 为中心，r 为黑洞半径，形成了三重黑洞区域。产生随机数 $l_1 \in [0,1]$。如果 $l_1 > p_1$，则 x_i 被系统中的黑洞 1 捕获；如果 $l_1 \in [p_2, p_1]$，则 x_i 被黑洞 2 捕获；如果 $l_1 < p_2$，则 x_i 被黑洞 3 捕获，捕获的粒子位置为

$$x_{ij}(t+1) = \begin{cases} (g_{best}(t)+x_{min})/2 + rr_3 & (l_1 > p_1) \\ g_{best}(t) + rr_3 & (p_2 \leqslant l_1 \leqslant p_1) \\ (g_{best}(t)+x_{max})/2 + rr_3 & (l_1 < p_2) \end{cases} \quad (5)$$

式中，i 为第 i 个个体，j 为个体维度；g_{best} 为第 t 代在整个种群中的全局最优解；x_{max}、x_{min} 为粒子搜索区域的上、下限，阈值常数 p_1、$p_2 \in [0,1]$，$p_1 < p_2$，r_3 为 $[-1,1]$ 区间内随机数。

根据式(5)计算 g_{best} 和 x_{min} 之间的平均距离，x_{min} 可以从被困在局部最优的 $g_{best}(t)$ 中摆脱出来。即可以通过引入 g_{best} 和 x_{min} 之间的平均值，使 $x_{ij}(t+1)$ 选择不同的黑洞，产生一个新的个体，从而增加当前个体多样性，避免陷入局部最优。

(2)多维随机干扰

微小的环境变化引起的小的随机干扰可以纠正植物的发育错误，这种现象被称为发育通道化。适应性和发育通道化的结合提高了植物对环境的适应性和发育稳定性[29-30]。在此启发下，在算法中引入多维随机干扰策略，增加搜索系统的小振幅变化，增强局部搜索系统的能力。当阈值常数 p_p（$p_p \in [0,1]$）小于等于每个搜索者每个维度随机值 k 时，采用干扰策略，公式为

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + (1+\psi r_4) \quad (6)$$

式中，ψ 为干扰度，r_4 为 $[-1,1]$ 区域内随机数。

(3)早熟干扰

当满足条件时重新设置搜索者的位置,使搜索者在 $g_{best}(t)$ 附近随机分布,从而有可能跳出局部最优,即

$$|F_g(t+1)-F_g(t)|<0.01|F_g(t+1)| \quad (7)$$

$$x_{ij}(t+1)=(g'_{best}(t+1)+g_{best}(t))r_a \quad (8)$$

式中,$F_g(t)$、$F_g(t-1)$ 分别为 t、$t-1$ 代全局最优对应的函数值,r_a 为在[-1,1]区域内随机数。$g'_{best}(t+1)$ 为 $t+1$ 代的当前最优解。

(4)MSSOA

MSSOA 引入三重黑洞系统捕获、随机干扰和早熟干涉策略,以提高 SOA 算法优化能力。MSSOA 的主要算法为:

1. 生成 N 个个体的初始种群 $X_{MSSOA,G}$。
2. 计算适应度。决定最优解 $P_{best,G}$。
3. Start while 循环,当迭代次数(t)不满足停止条件,生成搜索方向、搜索步长、新的搜索位置 $X_{MSSOA,G}$。

If $f(X_{MSSOA,G})\leqslant P_{best,G}$

$P_{best,G}=f(X_{MSSOA,G})$

end if

if rand $<P_m$

根据式(5)加入三黑洞系统捕获策略生成新的 $X_{MSSOA,G}$。

If $f(X_{MSSOA,G})\leqslant P_{best,G}$

$P_{best,G}=f(X_{MSSOA,G})$

end if

根据式(6)加入多维随机干扰策略生成新的 $X_{MSSOA,G}$。

If $f(X_{MSSOA,G})\leqslant P_{best,G}$

$P_{best,G}=f(X_{MSSOA,G})$

end if

根据式(7)、(8)加入早熟干扰策略生成新的 $X_{MSSOA,G}$。

If $f(X_{MSSOA,G})\leqslant P_{best,G}$

$P_{best,G}=f(X_{MSSOA,G})$

end if

end if

end while

2.2.2 烤房温度双指标控制与试验设计

烤房控制原理图如图 14 所示。图 15 为 MSSOA 算法优化烤房温度工艺参数过程图。

从图 14 可以看出,分别采用 SOA、MSSOA 算法寻找合适烟叶烤房的进口热风速度、烟叶孔隙率、分风板角度和烟层间距使得烤房在烘烤过程中,各层各点温度与控制标准温度(温度标准差)相差较小,并且各层各点温度之间(温度不均匀度)也相差较小。

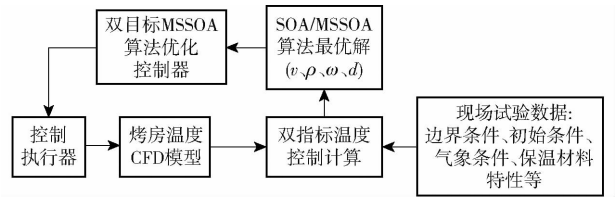


图 14 控制原理框图

Fig. 14 Block diagram of control principle

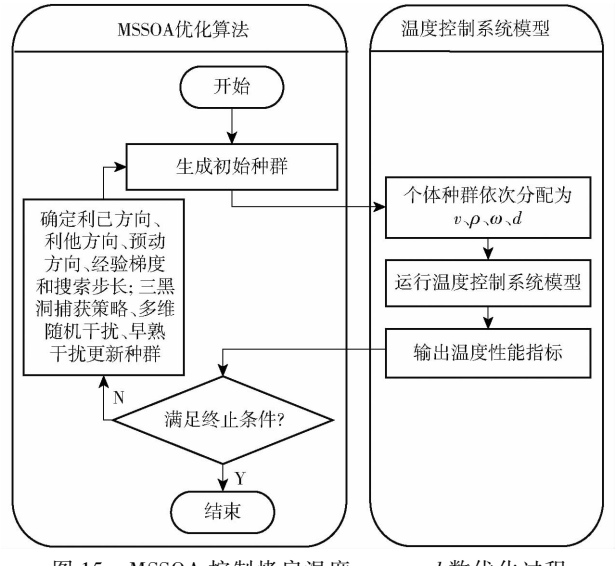


图 15 MSSOA 控制烤房温度 v、ρ、ω、d 数优化过程

Fig. 15 Optimization process of v, ρ, ω and d number controlled by MSSOA

3 试验

采用 SOA 和 MSSOA 算法对烤房在不同进口热风速度、烟叶孔隙率、分风板角度和烟层间距等工艺参数下温度标准差和不均匀度寻优,找到合适的工艺参数,使烤房温度与标准温度相差最小,且烤房内温度不均匀度最小。

3.1 不同算法优化参数结果比较

为了更好地了解 MSSOA 算法在烤房温度控制工艺参数优化方面的性能,将 MSSOA 算法与未改进 SOA 算法进行比较。2 个算法种群大小均为 50,所有测试的最大迭代次数为 300,最大隶属度 0.95,最小隶属度 0.011 1,最大惯性权重 0.9,最小惯性权重 0.1,经验值 0.2,多策略发生概率 0.8。

图 16 为 MSSOA 和 SOA 在烤房温度双指标单次优化的全局最佳适应度曲线。从图 16 可以看出,MSSOA 算法在第 174 代时找到相对最优解 0.514 17,对应的相对最优解即烤房温度控制工艺参数为入口热风速度 6 m/s、烟叶孔隙率 0.9、分风板角度 30°、烟层间距 250 mm。MSSOA 算法在烤房温度指标模型中具有最快的全局收敛速度和最高的收敛精度。从适应度进化过程可以看出,MSSOA 算法具有较强的寻找最优解的能力。MSSOA 算法能

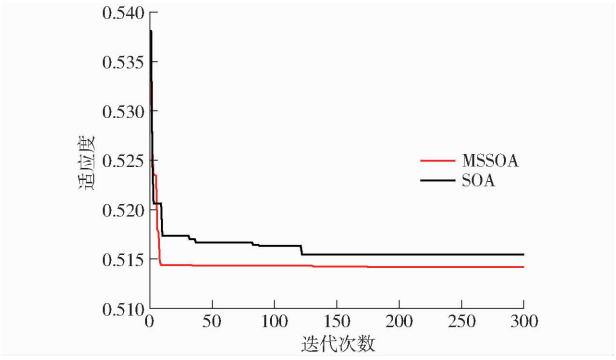


图 16　烤房温度控制工艺参数优化最佳适应度曲线

Fig. 16　Optimum fitness curves of temperature control process parameters in barn

够在最大迭代次数内收敛，并且在烤房温度控制工艺参数优化中具有较快的全局收敛速度和较高的收敛精度。

3.2　算法优化工艺和结构参数下烤房温度分布数值模拟

当采用算法优化的工艺参数：入口热风速度 6 m/s、孔隙率为 0.9、分风板角度 30°、烟层间距 250 mm 时，选取 Z = 1.35 m 平面，在 144 000、324 000、540 000、597 600 s 时间点温度分布云图如图 17 所示。从图 17 可以观察到，装烟室内温度分布相对均匀，竖直方向上温度梯度较水平方向变化明显，低温区占比较小，并且随着烘烤过程进行，不同时期整体温度分布与标准温度也更加接近。

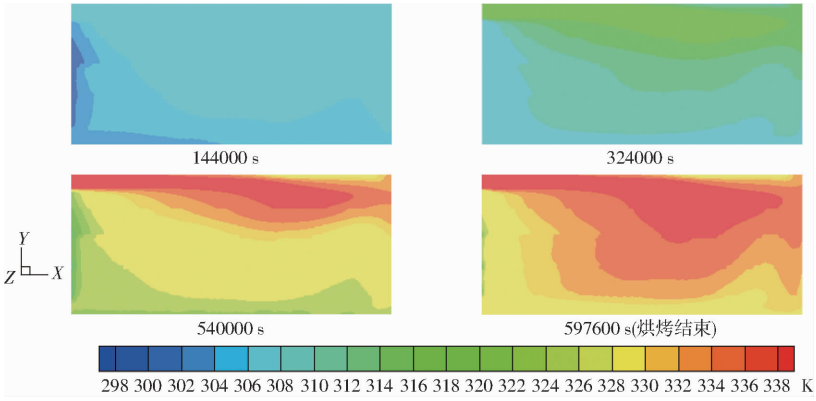


图 17　最优工艺参数烤房温度分布数值模拟云图（Z = 1.35 m 平面）

Fig. 17　Cloud image of numerical simulation of temperature distribution of optimal process parameters (Z = 1.35 m plane)

可见，采用优化后工艺参数对烤房温度进行仿真，烤房内烟叶温度标准差和不均匀度都相对较好，烤房内温度较接近标准温度，各点之间温度较均匀。

4　结论

（1）结合全闭式热风循环密集烤房烟叶烘烤温度调控的特点，引入温度标准差和温度不均匀度，采用标准差和不均匀度对烤房温度分时段进行建模，应用三黑洞系统捕获策略、早熟干扰和随机干扰策略，对人群搜索优化算法（SOA）进行改进，提出了一种多策略人群搜索优化算法（MSSOA）。

（2）基于 MSSOA 算法优化了全闭式热风循环密集烤房温度标准差和温度不均匀度，最优解为入口热风速度 6 m/s、烟叶孔隙率 0.9、分风板角度 30°、烟层间距 250 mm。

（3）将优化后的工艺参数代入 CFD 仿真模型，得到了相对较好的烤房温度控制，即在最优解下，随着烘烤过程的进行，不同时期整体温度分布与标准温度更为接近，提高了烤房温度控制均匀性。此外，与 SOA 算法相比，MSSOA 算法具有较强的寻找最优解能力，并且在烤房温度控制工艺参数优化中具有较快的全局收敛速度和较高的收敛精度。

参　考　文　献

[1] WANG J A, WEI F J, DUAN W D, et al. Performance of solar hot-water installations from roof-constructed solar collectors integrated with a central heating supply for tobacco curing[J]. Thermal Science, 2020, 24(3):1845 – 1852.

[2] SONG Z P, WEI F J, SU X F, et al. Application of automatic control furnace for combustion of biomass briquette[J]. Thermal Science, 2020, 25(4):2425 – 2435.

[3] REN K, JI X W, CHEN Y, et al. Assessing the thermal efficiency and emission reduction potential of alcohol-based fuel curing equipment in tobacco-curing[J]. Scientific Reports, 2023, 13(1):1 – 13.

[4] 赵浩宾，胡永涛，李芳芳，等. 不同供热能源烤烟经济效益对比分析[J]. 农学学报，2021，11(11)：61 – 65.
ZHAO Haobin, HU Yongtao, LI Fangfang, et al. Economic benefits of different heating sources for tobacco curing: a comparative analysis[J]. Journal of Agriculture, 2021, 11(11): 61 – 65. (in Chinese)

[5] 谢守勇，张小亮，刘军，等. 烤房装烟机双旋转式烟叶装卸装置设计与试验[J]. 农业机械学报，2021，52(增刊)：26 – 35.
XIE Shouyong, ZHANG Xiaoliang, LIU Jun, et al. Design and test of double-rotating tobacco leaf loading and unloading device

of tobacco loading machine in curing barn[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(Supp.):26 – 35. (in Chinese)
[6] 张小亮, 李生春, 钟仁杰, 等. 密集烤房倾斜旋转式装烟机设计与试验[J]. 中国农机化学报,2022, 43(11):90 – 97.
ZHANG Xiaoliang, LI Shengchun, ZHONG Renjie, et al. Design and experiment of inclined rotary to bacco loading machine in dense baking house[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2022, 43(11):90 – 97. (in Chinese)
[7] 韩佳彤, 马欣, 王晋军, 等. 升降式烤烟密集烤房挂烟系统研发[J]. 现代化农业, 2023(10):94 – 96.
HAN Jiatong, MA Xin, WANG Jinjun, et al. Research and development of tobacco hanging system in bulk curing barn [J]. Modernizing Agriculture, 2023(10):94 – 96. (in Chinese)
[8] ZHANG Y, LI B, HE Z F, et al. Temperature field simulation and energy analysis of a heat pump tobacco bulk curing barn [J]. Energies,2022, 15(22): 1 – 16.
[9] 王艺焜, 祖庆学, 秦敏, 等. 密集烤房循环风机智能控制器的研发与应用[J]. 农业开发与装备, 2023(9):155 – 157.
WANG Yikun, ZU Qingxue, QIN Min, et al. Development and application of intelligent controller for circulating fan in dense oven [J]. Agricultural Development & Equipments, 2023(9):155 – 157. (in Chinese)
[10] 陈祖销, 李俊营, 藏照阳, 等. 气流上升式密集烤房温湿度场分布及其对烟叶质量的影响[J]. 烟草科技,2024, 57(3):364 – 372.
CHEN Zuxiao, LI Junying, ZANG Zhaoyang, et al. Temperature and humidity distributions and their influences on tobacco leafquality in air ascending bulk curing barn[J]. Tobacco Science & Technology,2024,57(3):43 – 55. (in Chinese)
[11] 成勋松, 陈和春, 蒋笃忠. 密集烤房应用研究Ⅰ. 密集烤房与普通烤房应用效果对比[J]. 湖北农业科学,2009(9): 114 – 116.
CHENG Qingsong, CHEN Hechun, JIANG Duzhong. Study on application of bulk curing barn Ⅰ. Contrast of application effect between bulk curing barn and traditional flue-curing barn[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2009(9): 114 – 116. (in Chinese)
[12] 崔国民, 叶继宗, 罗会龙, 等. 烤烟密集型自动化烤房及烘烤工艺技术[M]. 北京:科学出版社,2014.
[13] 许锡祥, 陈承亮, 吕作新, 等. 几种新型密集烤房烘烤效果比较[J]. 中国烟草科学,2017,38(5):82 – 86.
XU Xixiang, CHEN Chengliang, LÜ Zuoxin, et al. Study on several new type bulk curing barns and their curing effects[J]. Chinese Tobacco Science,2017,38(5):82 – 86. (in Chinese)
[14] TIPPAYAWONG N, TANTAKITTI C, THAVORNUN S. Use of rice husk and corncob as renewable energy sources for tobacco-curing[J]. Energy for Sustainable Development,2006,10(3):68 – 73.
[15] 李志民, 罗会龙, 钟浩, 等. 烟叶密集烤房供热设备分析比较及发展方向[J]. 煤气与热力,2011,31(7):12 – 14.
LI Zhimin,LUO Huilong,ZHONG Hao, et al. Analytical comparison and development trend of heating equipment in tobacco bulk curing barn[J]. Gas & Heat,2011,31(7):12 – 14. (in Chinese)
[16] 崔国民, 师进林, 杨子娟, 等. 初烤烟叶评吸质量主成分分析[J]. 安徽农业科学,2012,40(19):10271 – 10272,10278.
CUI Guomin, SHI Jinlin, YANG Zijuan, et al. Application of principal component analysis in smoking quality evaluation of cured tobacco leaves[J]. Journal of Anhui Agri.,2012,40(19):10271 – 10272,10278. (in Chinese)
[17] GHASEM N. CFD simulation of CO_2 absorption by water-based TiO_2 nanoparticles in a high pressure stirred vessel[J]. Scientific Reports, 2021, 11(1): 1984.
[18] REZENDE T R, VIANNA R F, LUPORINI S. Simulation of a plate heat exchanger operating with nanofluid coolant using CFD [J]. International Journal of Heat and Technology,2021,39(1):235 – 240.
[19] MESGARPOUR M, BAHIRAEI M, WONG W, et al. A CFD study of $[C_2mim][CH_3SO_3]/Al_2O_3$ ionanofluid flow and heat transfer in grooved tubes[J]. International Journal of Thermophysics,2021,42(32):1 – 17.
[20] 董霖,王爽,欧阳锐凌, 等. 网带式花椒干燥机流场模拟与结构优化[J]. 农业机械学报, 2023,54(增刊 1):373 – 380.
DONG Lin, WANG Shuang, OUYANG Ruiling, et al. Flow field simulation and structural optimization of mesh-belt pepper drying machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(Supp. 1):373 – 380. (in Chinese)
[21] 张宝峰,司香,辛明金, 等. 小型搅拌解回燃式生物质炭化炉设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024,55(9):411 – 419.
ZHANG Baofeng, SI Xiang, XIN Mingjin, et al. Design and experiment of a small carbonization kiln with biomass stirring and backburning mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024,55(9):411 – 419. (in Chinese)
[22] 宫长荣, 陈江华, 吴洪田, 等. 密集烤房[M]. 北京:科学出版社,2010.
[23] VERSTEEG H K, MALALASEKERA W. An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method[M]. New York: Wiley, 1995.
[24] PATANKAR S V. Numerical heat transfer and fluid flow hemisphere[M]. John Benjamins Publishing Co., 1980.
[25] HERMANN S. Boundary layer theory[M]. 8th ed. New York: Mc Graw Hill, 1979.
[26] DAI C, ZHU Y, CHEN W. Seeker optimization algorithm[C]// Proc. 2006 Inter. Conf. Computational Intelligence and Security. Guangzhou: IEEE Press,2006:225 – 229.
[27] VALTONEN M J. Merging galaxies and black hole ejections[J]. International Astronomical Union Colloquium, 1990,124:497 – 502.
[28] VALTONEN M J. Triple black hole systems formed in mergers of galaxies[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 1996,278(1):186 – 190.
[29] SULTAN S E. An emerging focus on plant ecological development[J]. New Phytologist, 2005,166(1):1 – 5.
[30] WADDINGTON C H. The strategy of the genes[M]. London: Routledge,2014.