网络出版时间:2025-10-31 DOI:10.13207/j.jnwafu.2026.04.019

基于HSIC的烘烤场景多源异构传感器优化配置策略

庞枫林[1],路绪良[1],冀新威[2],苏家恩[3],胡彬彬[4],陈颐[4],宋朝鹏[1],姜永雷[4]
(1 河南农业大学 烟草学院,河南 郑州 450046;2 云南省烟草公司红河州公司,云南 红河 661199;3 云南省烟草公司大理州公司,云南 大理 671014;4 云南省烟草农业科学研究院,云南 昆明 650021)

[摘 要] 【目的】有效探究密集烤房内部温湿度的非均匀性分布,并实现对烤房内部环境的准确感知,解决传感器点位过多存在的多源数据冗余问题。【方法】以可移动智能密集烤房为研究对象,获取烘烤周期内24个温湿度传感器共861×24个离散时序数据,基于希尔伯特-施密特独立性准则(Hilbert-Schmidt independence criterion,HSIC),引入贝叶斯数据融合原理(Bayesian method),依托信息最大化原则以及信息增益率和配置冗余度约束,明确传感器配置优先级排序和数量选择依据,构建多源异构传感器优化配置策略。【结果】密集烤房内部温湿度场分布存在显著的非均匀性,不同区域间具有较强的非线性相关性。基于传感器优化配置策略,确定在减少传感器50%数量冗余条件下选取S1、S5、S4、S6、S7、S8、S11、S16、S13、S14、S21、S24共12个传感器对象。相比于原始数据,点位优化后RMSE为0.663 8,温湿度信息增益率g_r分别为0.018 2和0.001 8。【结论】基于密集烤房温湿度非均匀分布构建的传感器配置策略能够有效保证温湿度的感知精度与信息丰度,并可完成烘烤环境智能感控及不同品质烟叶烘烤工艺制定和烤房结构优化设计。

[关键词] 烤烟;密集烤房;温湿度;传感器配置;数据融合
[中图分类号] TS43 [文献标志码] A [文章编号] 1671-9387(2026)04-0169-12

Optimization configuration strategy for multi-source heterogeneous sensors in curing scenarios based on HSIC

PANG Fenglin[1],LU Xuliang[1],JI Xinwei[2],SU Jiaen[3],HU Binbin[4],
CHEN Yi[4],SONG Chaopeng[1],JIANG Yonglei[4]
(1 *College of Tobacco,Henan Agricultural University,Zhengzhou,Henan* 450046,*China*;2 *Yunnan Tobacco Company Honghe Prefecture Company,Honghe,Yunnan* 661199,*China*;3 *Yunnan Tobacco Company Dali Prefecture Company,Dali,Yunnan* 671014,*China*;4 *Yunnan Academy of Tobacco Agricultural Sciences,Kunming,Yunnan* 650021,*China*)

Abstract:【Objective】This research aims to effectively explore the non-uniform distribution of temperature and humidity inside the dense oven and realize the accurate perception of the baking scene,to solve the problem of multi-source data redundancy caused by excessive sensor points.【Method】A mobile intelligent dense oven was used as the research object to obtain a total of 861×24 discrete time series data of 24 temperature and relative humidity sensors during the baking cycle. With HSIC as the basis,the Bayesian data fusion principle was introduced. Based on the principle of information maximization,information gain rate,and configuration redundancy constraints,the priority ranking and quantity selection basis for sensor configuration were clarified,thereby

[收稿日期] 2025-01-13 [修回日期] 2025-06-19
[基金项目] 中国烟草总公司云南省公司科技计划重大项目“基于多场协同的热湿匀质传递密集烘烤关键技术研究与应用”(2024530000241023)
[作者简介] 庞枫林(2001—),男,河南巩义人,在读硕士,主要从事烟草调制与加工研究。E-mail:2085305048@qq.com
[通信作者] 姜永雷(1988—),男,河南周口人,副研究员,博士,主要从事烟草调制技术研究。E-mail:jiangyatas@163.com

中国知网 https://www.cnki.net

establishing an optimal configuration strategy for multi-source heterogeneous sensors.【Result】There was a significant non-uniformity in the distribution of temperature and relative humidity field in the bulk curing barn, and there was a strong non-linear correlation among different regions. Based on the sensor optimization configuration strategy, a total of 12 sensor objects, namely S1, S5, S4, S6, S7, S8, S11, S16, S13, S14, S21 and S24, were selected under the condition of reducing the sensors by 50%. Compared with the original data, the RMSE after site optimization was 0.663 8, and the information gain rate (g_r) of temperature and relative humidity were 0.018 2 and 0.001 8, respectively.【Conclusion】The sensor configuration strategy developed in consideration of the non-uniform distribution of temperature and relative humidity in the bulk curing barn can effectively ensure the perception accuracy and information abundance of temperature and relative humidity, and can provide theoretical basis and technical reference for intelligent monitoring and control of the curing environment, the development of curing process for tobacco leaves of varying qualities, and the optimized design of curing barn structures.

Key words: flue-cured totacco; intensive curing room; temperature and relative humidity; sensors configuration; data fusion

烟草行业的发展,使得大装烟量、高效率的密集烤房成为我国烟叶烘烤的主流设备[1]。研究表明,烤房内部环境和工艺进程是影响烘烤品质的重要因素[2-3]。准确感知烤房内部环境变化对于全面监测烘烤场景及研究温湿度场分布特性至关重要。当前,烤房内部环境的感知主要依赖人工经验或传感器对各项环境参数进行采集。随着研究技术的进步,研究人员利用诸如计算流体力学(CFD)和物理仿真模型对烤房内部温湿度、风速等流场进行模拟,取得较为逼真的结果[4-5]。但以上方法存在需求高、耗时长和计算成本高等问题,难以适应烘烤环境的动态演变。因此传感器采集依然是快速准确获取烤房环境参数的最有效直接方式。

由于气流方向、装烟密度等烘烤条件差异,加之烤房自身的封闭性,同一阶段烤房内部各区域温湿度场分布具有明显的非均匀性。为对其实现准确感知,研究者采用多传感器阵列进行简单排布,以尽可能覆盖被测区域[6-8]。然而传感器布置过多往往导致数据冗余、故障率增加及影响烘烤效率;布置过少,则无法充分监测烤房内部环境参数信息,影响数据精度。因此,建立有效的传感器优化配置策略具有重要的现实意义和研究价值。为实现对烤房内部环境准确全面感知,需同时收集传输并处理大量多位点温湿度数据,这使数据高度异构且复杂,需对多传感器进行优化配置和有效数据集成。目前对于烤房多传感器优化配置的研究和多源信息处理的手段相对缺乏。其他领域利用诸如聚类、遗传算法和物元分析数量优化原理[9-11]以及z-index、弱约束高斯过程模型等数据处理方法对传感器数量和点位进行优化[12-14],为本研究提供了有益参考。同时,信息融合技术的发展使得卡尔曼滤波、贝叶斯、加权平均等融合手段被广泛应用,为烤房内动态多源信息提供有效数据集成途径的同时保障了数据的准确性和处理效率[15-16]。

针对目前缺乏有效的烤房多源传感器优化配置策略现状,本研究基于物联网构建的密集烤房烘烤环境多传感器异构数据感知系统,通过传感器空间均布采集24个测点的温湿度数据,利用希尔伯特-施密特独立性准则分析各测点间的独立性,根据综合独立系数对传感器进行优先级排序,进而通过冗余分析和贝叶斯融合优化点位,最终验证在密集烤房内部温湿度存在非均匀分布背景下传感器优化配置策略的有效性,为密集烤房环境参数的感知与调控提供技术支撑,对后续研究烤房内部环境特性及优化烤房结构设计提供数据参考。

1 材料与方法

1.1 试验密集烤房

烤房内部热湿环境分布特性在受烘烤特性影响的同时,烤房自身的结构特性也会造成其内部热湿数值的分布差异。目前有关烤房结构的行业标准,主要以两仓3台和两仓4台为主,两者结构并无显著区别;同时相较于其他地区所使用的其他主流结构烤房,本试验依托云南烟区使用的两仓4台烤房内部的烘烤特性,如高温区、低温区等热湿分布规律依然具有普适性。

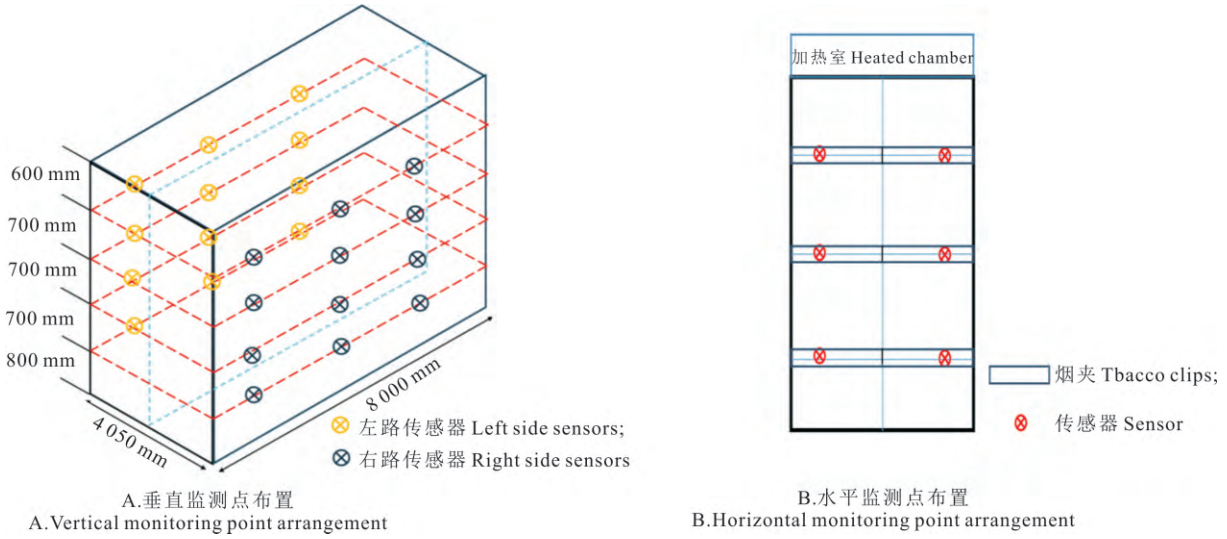
试验于云南省曲靖市马龙区鸡头村烘烤工厂进行,以规格为长8.0 m、宽2.7 m、高4.1 m的两层4台气流下降式可移动智能密集烤房为研究对象,在2024年8月26日至9月10日开展试验,并对15 d

中国知网 https://www.cnki.net

内采集到的离散温湿度数据进行试验分析和策略验证。烘烤工艺按当地常规三段式烘烤进行，装烟密度以当地的装烟标准为依据设置。

1.2　密集烤房内温湿度数据采集

为准确采集密集烤房内数据信息，采用自主研发的密集烤房环境监测系统，包括24个温湿度传感器（TS-FTM01，厦门泰勒士科技）、数据采集处理模块树莓派（RaspberryPi 4B，8G/256G）及物联网监控平台，以10 min为数据采集周期，每批次烘烤周期从烤烟入库至烘烤结束170 h，连续采集3次，并对各传感器3批次数据取平均值，共获得1 020×24个样本点离散时变数据集。基于文献研究可知，烘烤过程中烤房内不同方向维度温湿度普遍存在差异，且局部区域差异显著[17]，因此为全面反映密集烤房内环境信息，需在不同高度、水平位置将烤房内部划分为若干区域，以监测点等距布置原则，每层三等分点各设1对传感器，水平方向将传感器悬挂在烟夹靠近墙壁侧1/4处，实际安装如图1所示。随机选取任一高度和水平位置区域内部传感器数据探究温湿度分布特性，为传感器优化配置策略提供数据支持和研究基础。



A.垂直监测点布置
A.Vertical monitoring point arrangement

B.水平监测点布置
B.Horizontal monitoring point arrangement

图1　装烟室温湿度传感器分布示意图

Fig. 1　Distribution diagram of room temperature humidity sensor for cigarette loading

1.3　传感器优化配置原理

1.3.1　基于希尔伯特-施密特独立性准则的传感器独立性计算及优先级算法排序

由于烟叶阻力等因素的影响，烤房内部各区域间存在显著的热质交换和水汽流动[18]，导致不同位点的传感器数据呈现非线性相关性。相比传统的皮尔逊相关系数，希尔伯特-施密特独立性准则（Hilbert-Schmidt independence criterion，HSIC）具有收敛速度快、鲁棒性强且对异常值敏感性低等优势，能够有效捕捉和评估不同位点数据间的非线性关系，为传感器布置优化策略提供理论基础和技术支持[19]。

HSIC的理论基础源自再生核希尔伯特空间（reproducing kernel Hilbert space，RKHS）的嵌入思想，可以将概率分布映射为高维空间中的点，从而利用核函数来度量变量间的依赖性。在进行独立性检验时，核函数的选择对于判别效果具有重要影响。因此凭借良好的非线性建模能力，以及适用于捕捉复杂的数据依赖关系特性，本研究采用高斯径向基核（RBF核）来度量数据间的相关性，以N个相同类型传感器采集的数据为变量（$X_1, X_2, \cdots, X_N$），利用式（1）～（3）计算HSIC矩阵并量化分析其数据独立性。

在评价独立性的基础上，为给传感器优先级排序提供依据，定义传感器个体$s \notin S$与群体S中所有传感器之间综合独立系数[20]为$r(s,S)$，综合独立系数越大，表明个体s与群体S的独立性越低，个体的监测值越能代表烤房内温湿度的整体变化趋势。

假设X、Y为2个可观测变量，F和G分别为包含变量X和Y特征映射的非线性再生核希尔伯特空间（RKHS），表示为$\varphi(x) \in F$和$\varphi(y) \in G$，且$x \in X$、$y \in Y$，则相应的核函数分别记为[21-23]：

$$k(x,x')=[\varphi(x),\varphi(x')],x,x' \in X;$$
$$l(y,y')=[\varphi(y),\varphi(y')],y,y' \in Y。 \quad (1)$$

HSIC的计算基于Hilbert-Schmidt范数，其是

中国知网　https://www.cnki.net

衡量两个变量之间依赖关系的一种度量。具体而言,HSIC可以通过联合协方差算子的Frobenius范数来计算,取平方得到2个数据x、y的HSIC,定义如下:

$$\mathrm{HSIC}(P_{xy},F,G):=\left\|C_{xy}\right\|_{HS}^{2}=E_{x,x',y,y'}[k(x,x')l(y,y')]+E_{x,x'}[k(x,x')]E_{y,y'}[l(y,y')]-2E_{x,y}[E_{x'}[k(x,x')]E_{y'}[l(y,y')]]。\tag{2}$$

式中:P_{xy}为变量X、Y的概率分布;$\|\cdot\|_{HS}$表示Hilbert-Schmidt范数;k和l分别定义在X与Y上的核函数。

定义Z为2个同类型变量X和Y构成的数据集,并联立式(1)(2)得:

$$\mathrm{HSIC}(Z,F,G)=\frac{1}{n^{2}}\mathrm{trace}(KHLH)。\tag{3}$$

式中:trace(·)为迹函数;K、L、$H\in R^{n\times n}$,$K_{ij}=k(x_i,x_j)$,$L_{ij}=l(y_i,y_j)$,$H=I-\frac{1}{n}I_nI_n^{T}$,$I_n$为$n$维单位向量。

$$r(s,S)=\frac{1}{|S|}\sum_{s_i\in S}h(S,s_i)。\tag{4}$$

式中:s为某一个传感器个体;S为除去s后传感器群体的集合;s_i为S中第i个传感器;h为2个传感器温度数据之间的HSIC函数;$|S|$为集合S中传感器个数。

1.3.2 传感器数量选择依据 传感器优化配置应在确保烤房温湿度监测准确性和信息丰度的基础上,尽量减少传感器数量,以满足监测误差要求并有效表征温湿度空间分布。为此提出如下数量选择依据。

1)根据均值监测误差要求,满足其均值$T_{\text{ave-}n_1}$与全部传感器所得数据均值$T_{\text{ave-tot}}$的均方根误差(root mean square error,RMSE)小于监测误差要求err,并结合传感器优先级排序确定数量为n_1,其计算如式(5)所示。

$$n_1=|U_{\text{select 1}}|=\arg\min_{1\leqslant n_1\leqslant n}(\mathrm{RMSE}(T_{\text{ave-}n_1},T_{\text{ave-tot}})\leqslant\mathrm{err})。\tag{5}$$

式中:$U_{\text{select 1}}$为满足均值误差阈值要求的传感器集合;$|U_{\text{select 1}}|$为$U_{\text{select 1}}$中元素的个数。

2)信息丰度可以用数据的信息熵表征,熵值越大,则信息丰度越大。依据式(6)可得,随着遴选集合中传感器数量增多,新增传感器对集合的信息贡献度逐渐下降。为直观表示新增传感器数据对新组成传感器数据集的信息增益,采用信息增益率g_r来衡量新增传感器数据对数据集的信息贡献。当新增传感器对集合的信息增益率低于阈值时,为避免冗余并保持信息丰度,则认为新增传感器不能引入新的数据[24],最终确定数量为n_2。

3)为兼顾均值监测误差和信息丰度,温度维度在垂直和水平方向上所需传感器数量应取n_1和n_2中的较大值,然后进行并集选择得到传感器数量$n_{t\,\text{select}}$。同时采取相同方法确定在湿度维度上所需传感器数量$n_{h\,\text{select}}$。选取温度、湿度两个维度上所需传感器数量$n_{t\,\text{select}}$和$n_{h\,\text{select}}$的较小值,确定为最终满足减少数量冗余条件的传感器最佳数量n。

$$H(Y|X)=\sum_{x}p(x)\left[-\sum_{y}p(y|x)\log_2p(y|x)\right]=\sum_{x}p(x)H(Y|x)。\tag{6}$$

式中:$H(\cdot)$表示条件熵,即离散随机变量条件下自信息的平均值;$p(\cdot)$为变量的概率分布。

$$g_r=\frac{IG(Y|X)}{H(X)}=\frac{H(Y)-H(Y|X)}{H(X)}。\tag{7}$$

式中:$IG(Y|X)$表示新增数据变量Y后对于新数据集$[X,Y]$的信息增益。

$$n_2=|U_{\text{select 2}}|=\arg\min_{1\leqslant n_2\leqslant n}[g_r(s_{n_2+1},U_{\text{select 2}})<g_{r\,\text{threshold}}]。\tag{8}$$

$$\begin{aligned}&n_{\text{select}}=\max(n_1,n_2);\\&n=\min(n_{h\,\text{selcet}},n_{t\,\text{selcet}})。\end{aligned}\tag{9}$$

1.3.3 传感器配置策略确定 为了给密集烤房内部环境提供更全面、准确的环境感知结果,确保传感器优化策略的有效性与普适性,对温湿度层面选择的传感器对象并集选择,并引入基于贝叶斯定理的数据融合算法,从而确定温湿度综合维度所需传感器对象,寻找最佳点位分布[25-26],流程如下。

1)依据式(9)选取n个传感器组成集合$U_{\text{select 3}}$,以标准温湿度的均值方差为先验值(μ_{prior}、σ^2_{prior}),各传感器j的测量值X_{cj}(c表示选取的传感器组合)的均值方差记为μ_j和σ_j^2,按贝叶斯定理计算后验均值方差($\mu_{\text{posterior}}$)。

2)将所选的传感器集合中温湿度数据以及标准温湿度数据按照式(11)进行多源融合,形成联合状。

3)计算通过贝叶斯融合得到的各集合融合数据与标准工艺融合数据之间均方根误差MSE,误差越小表明拟合度越高,据此确定最优布置方案。

中国知网 https://www.cnki.net

$$\sigma^2_{\text{posterior}} = 1/\left(\frac{1}{\sigma^2_{\text{prior}}} + \frac{n}{\sigma_j^2}\right);$$
$$\mu_{\text{posterior}} = \left(\frac{\mu_{\text{prior}}}{\sigma^2_{\text{prior}}} + \sum_{j=1}^{n}\right)\frac{\mu_j}{\sigma_j^2}\sigma^2_{\text{posterior}}。 \quad (10)$$

式中：$\mu_{\text{prior}}/\sigma^2_{\text{prior}}$表示先验知识的权重。

对融合温湿度数据进行贝叶斯融合处理，有：

$$\text{Combined}_{\text{fused}} = \begin{pmatrix} T_{\text{fused}} \\ H_{\text{fused}} \end{pmatrix}。 \quad (11)$$

式中：T_{fused}、H_{fused}分别为贝叶斯融合后的温湿度数据。

均方误差的表达式为：

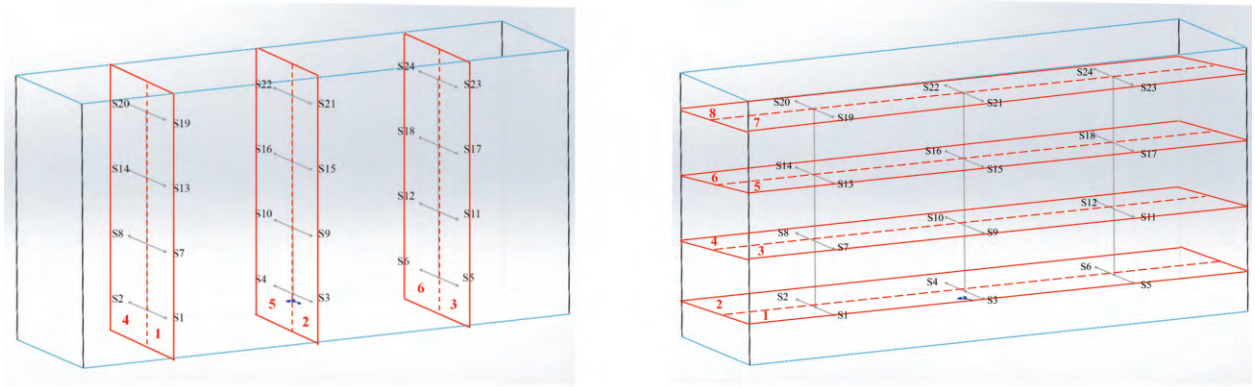
$$\text{MSE} = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}\left(Y_j - \hat{Y}_j\right)^2。 \quad (12)$$

式中：Y_j为标准温湿度的联合状态融合数据；$\hat{Y}_j$为各集合的联合状态融合数据。

2　结果与分析

2.1　烤房内部温湿度非均匀性分析

为有效探究密集烤房内部温湿度场分布，垂直方向根据烤房前中后及左右对称关系，划分为6组区域（如S1、S7、S13、S19为区域1），如图2-A所示；水平方向依据不同高度及左右对称关系分4层（4台即4层烟叶）两列共8个区域（如S1、S3、S5为区域1），如图2-B所示；T_i、H_i（i=1，2，3…）用以区分不同传感器所采集的温度、相对湿度数据。通过选取垂直和水平方向任一区域传感器数据，对密集烤房内部不同方向热湿环境进行非均匀性探究，以证明环境内部单一测点具有局限性，不能完全表现烘烤过程中烤房内部的非均匀性环境分布情景，需要多传感器获取不同区域的热湿数据。



A.垂直区域
A.Vertical zone divison

B.水平区域
B.Horizontal zoning

图2　不同方向传感器区域划分示意图

Fig. 2　Schematic diagram of sensor area division in different directions

分别选取垂直方向区域1、水平方向区域2内温湿度传感器，通过分析170 h全周期数据，以探究不同高度及水平区域上温湿度分布的非均匀性。由于变黄后期至定色前期是影响烟叶烘烤品质的关键阶段，需对此进行重点研究。

2.1.1　温度的非均匀性　选择垂直区域1和水平区域2分析烤房内部温度的非均匀性。如图3-A显示，垂直方向上，周期内温度曲线趋势一致，随烘烤进程逐渐上升。变黄后期至定色前期，温度随层数增高而上升，定色初期最大温差2.7 ℃，超出工艺阈值，呈现明显非均匀性。箱式图（图3-C）分析显示，各位点均值与数据分布存在差异。温度分布云图结果（图3-E）表明，在不同高度及距离烤房加热室远近表现显著的色温变化和等温线疏密程度的差异，进一步印证垂直方向上温度的非均匀性，整体上表现为随着高度的增加，色温变深，等温线逐渐稀疏，即温度升高梯度逐渐变小，其中在烤房中部高度600～1 500 mm等温线密集，呈现下凹态势，这表明在该范围同一高度中部温度普遍高于两侧，且温度梯度差异较大。水平方向上周期内温度数据变化趋势与垂直方向相同，而同一水平各测点温度显示出梯度差异，具体表现为烤房中部区域温度高于同一水平前后区域。

2.1.2　相对湿度的非均匀性　同样以垂直区域1和水平区域2为例，与探究温度非均匀性的方法一致，分析烤房内部相对湿度的非均匀性，结果表明，垂直方向上相对湿度整体呈锯齿状下降，各位点趋势一致，但最底层（S1）相对湿度高出其他层20%。同

中国知网　https://www.cnki.net

样地,与垂直方向一致,同一水平各测点相对湿度显示出梯度差异:烤房前后区域相对湿度较中部区域偏低,其中变黄期和干筋期同一时刻水平方向上的相对湿度间差值远大于定色期(图 3-B)。箱式图(图 3-D)表明,各点位在均值、数据分布上均有差异且数据分布离散化。图 3-F 更进一步直观显示水平方向相对湿度的非均匀性所表现色温的不均匀性。相对湿度在靠近烤房门约 3 500 mm 处达到最大值,颜色最深,对应的相对湿度超过 77.1%;而远离烤房门方向和靠近右侧墙壁区域相对湿度逐渐减小,颜色变浅,最低可降至约 68.2%。整体来看,相对湿度呈中心高、边缘低的分布趋势,说明热湿空气在此截面内存在一定积聚中心。

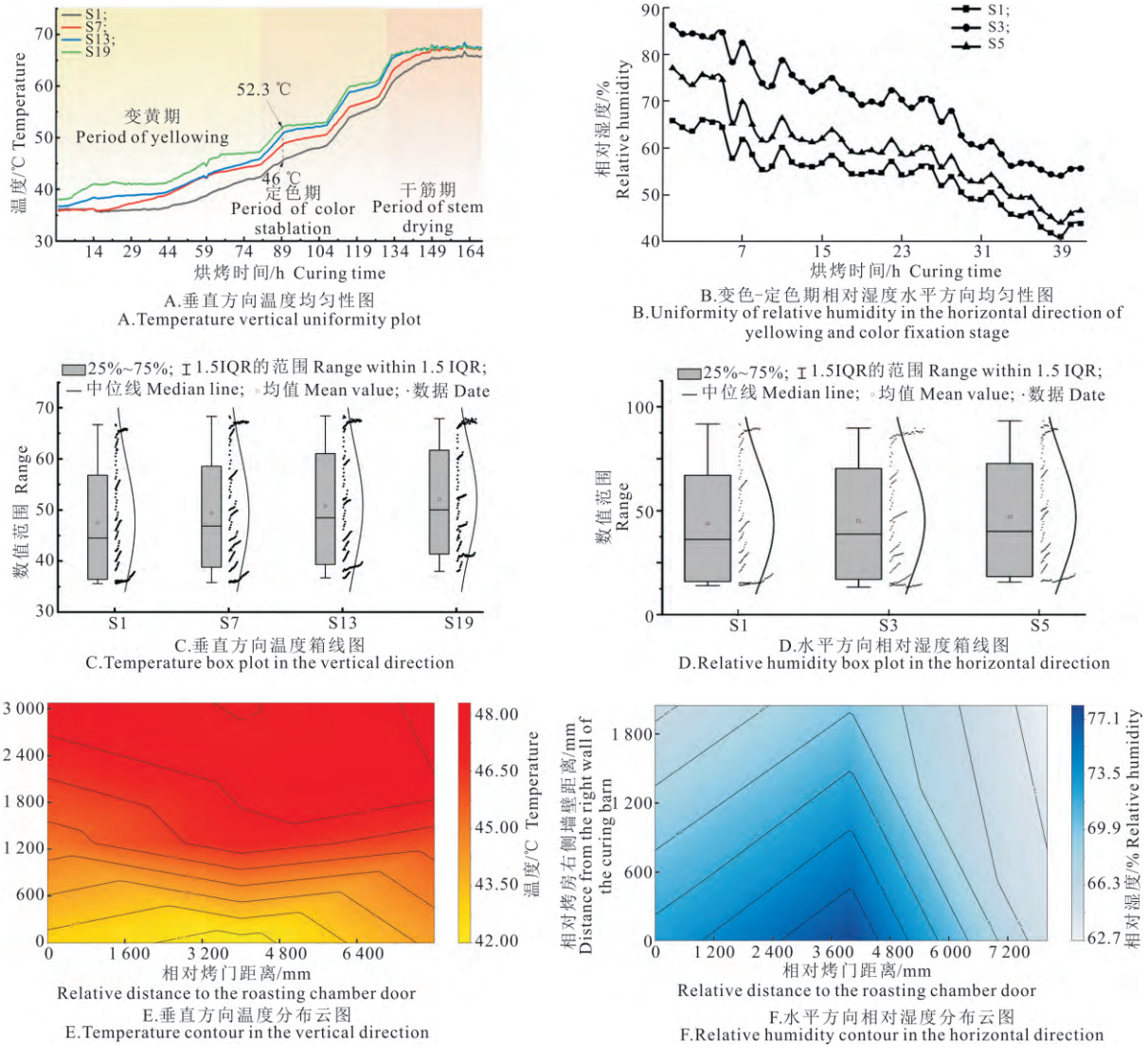


图 3 烘烤过程中不同方向温湿度分布

Fig. 3 Temperature and relative humidity distribution in different directions during the curing process

综合数据分析结果显示,烤房内部各方向上温湿度均呈现非均匀性,这表明单一测点的数据难以完全表征室内的环境分布,有必要采用多传感器获取不同区域温湿度数据。同时,测点间存在相关性说明,可通过优化配置减少传感器数量和数据冗余。

2.2 烤房内传感器优先级排序

依据优先级排序策略,按照 r 值高低依次选择,从垂直和水平 2 个方向上对传感器进行优先级排序,结果见表 1 和表 2。由表 1 和表 2 可以看出,温度维度表现为优先级靠前的传感器对象在相对湿度维度上的优先级仍处于前列,如 S13、S21、S5、S8、S6 等,这说明以上传感器在温、湿度两个维度数据对于整体温湿度数据有强关联性,所处位点代表性强。对比分析垂直、水平方向各区域优先级排序结果可以发现,排序靠前的传感器对象存在交集,由

中国知网 https://www.cnki.net

于划分区域数量不同，如S22、S11、S8、S14等传感器对象在水平方向划分区域内优先级最高，而在垂直方向区域内则表现为较高或低优先级。因此在制定传感器优化策略时，应综合考虑两个方向优先级排序结果选择传感器对象。

表1　垂直方向温度和相对湿度不同区域位置传感器优先级排序

Table 1　Prioritization of sensors in different temperature and relative humidity areas in the vertical direction

区域 Region	优先级排序 Prioritization	温度 Temperature		相对湿度 Relative humidity		区域 Region	优先级排序 Prioritization	温度 Temperature		相对湿度 Relative humidity	
		传感器位置 Sensor position	r值 r value	传感器位置 Sensor position	r值 r value			传感器位置 Sensor position	r值 r value	传感器位置 Sensor position	r值 r value
1	1	S13	0.036 7	S1	0.132 0	4	1	S8	0.032 9	S2	0.113 3
	2	S7	0.036 2	S13	0.129 7		2	S14	0.032 0	S8	0.112 8
	3	S1	0.036 2	S7	0.126 7		3	S20	0.030 1	S14	0.106 9
	4	S19	0.034 1	S19	0.122 0		4	S2	0.028 7	S20	0.104 7
2	1	S21	0.037 2	S3	0.130 8	5	1	S16	0.033 3	S4	0.126 0
	2	S15	0.036 9	S21	0.126 0		2	S4	0.033 2	S10	0.120 7
	3	S3	0.036 8	S15	0.125 8		3	S10	0.033 0	S16	0.120 2
	4	S9	0.035 2	S9	0.122 3		4	S22	0.031 9	S22	0.116 2
3	1	S5	0.036 1	S5	0.131 6	6	1	S6	0.033 6	S6	0.126 7
	2	S11	0.036 1	S11	0.130 0		2	S18	0.031 0	S12	0.124 9
	3	S17	0.034 0	S17	0.124 7		3	S24	0.030 6	S18	0.119 7
	4	S23	0.033 8	S23	0.122 2		4	S12	0.030 2	S24	0.118 0

表2　水平方向温度和相对湿度不同区域位置传感器优先级排序

Table 2　Prioritization of sensors in different temperature and relative humidity areas in the horizontal direction

区域 Region	优先级排序 Prioritization	温度 Temperature		相对湿度 Relative humidity		区域 Region	优先级排序 Prioritization	温度 Temperature		相对湿度 Relative humidity	
		传感器位置 Sensor position	r值 r value	传感器位置 Sensor position	r值 r value			传感器位置 Sensor position	r值 r value	传感器位置 Sensor position	r值 r value
1	1	S5	0.037 9	S3	0.145 2	5	1	S13	0.036 6	S13	0.127 1
	2	S3	0.037 7	S1	0.145 1		2	S15	0.036 4	S15	0.125 2
	3	S1	0.037 5	S5	0.144 8		3	S17	0.034 9	S17	0.123 9
2	1	S6	0.034 0	S4	0.136 5	6	1	S14	0.033 2	S16	0.113 1
	2	S4	0.033 0	S6	0.135 7		2	S16	0.033 2	S18	0.112 5
	3	S2	0.030 5	S2	0.131 5		3	S18	0.032 3	S14	0.108 7
3	1	S11	0.036 5	S11	0.127 6	7	1	S21	0.034 7	S21	0.118 9
	2	S7	0.036 1	S7	0.125 3		2	S23	0.033 1	S19	0.116 9
	3	S9	0.035 0	S9	0.122 7		3	S19	0.033 0	S23	0.116 7
4	1	S8	0.033 6	S12	0.124 0	8	1	S22	0.029 5	S24	0.107 9
	2	S10	0.032 7	S10	0.123 1		2	S24	0.029 2	S22	0.107 6
	3	S12	0.031 4	S8	0.122 3		3	S20	0.029 0	S20	0.104 6

2.3　烤房内传感器数量的选择

2.3.1 *垂直方向的数量选择*　由图4-A可以看出，随着区域内所选新增传感器数量的增加，所能引入的信息增益率呈逐渐递减趋势，且当传感器数量增加至一定数目时，选定信息增益率阈值g_r，从而可以确定满足阈值的最少传感器数量$n_{1\text{-vertical}}$。依据温湿度的信息增益率趋势，选定g_r=0.65为信息增益率阈值，低于此阈值时认定新增传感器为烤房区域提供的信息增益十分有限。

中国知网　https://www.cnki.net

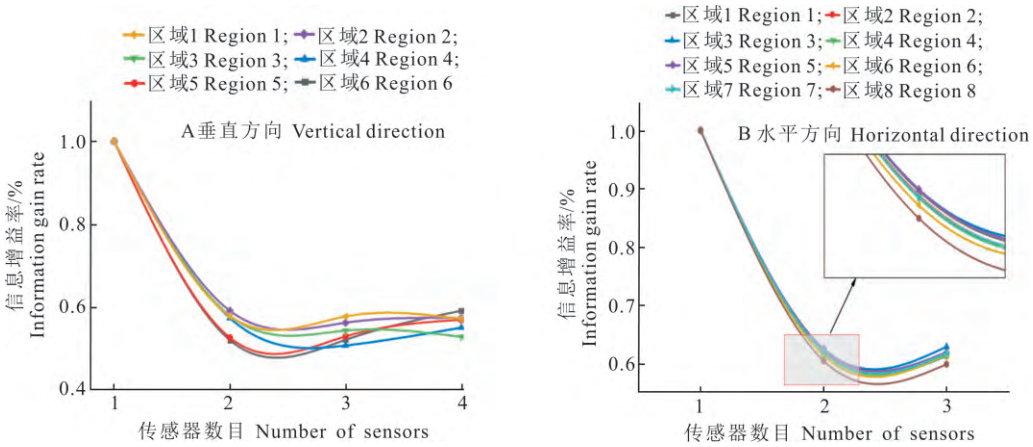


图4 信息增益率随传感器数目的变化趋势

Fig. 4 Variation trend of information gain rate with the number of sensors

均方根误差RMSE是传感器数量选择的另一个重要依据。由图5-A可以看出,随着传感器数量的增加,RMSE呈逐渐下降趋势,结合实际生产中所允许的温湿度误差,分别设定温湿度均方根误差RMSE阈值为1.5 ℃和8%,即确定满足阈值的最小传感器数量为$n_{2\text{-vertical}}$。由于研究对象涉及温湿度场分布,需确定温度和相对湿度在垂直方向上所满足的最小传感器数量,结果见表3。

2.3.2 水平方向的数量选择 同样对水平方向上不同区域信息增益率及均方根误差进行分析,结果见图4和5。由图4-B和图5-B可以看出,除局部波动幅度不同外两者趋势与垂直方向保持一致。结合数量选择原则与工艺允许误差,温湿度信息增益率阈值均设定为0.65,均方根误差阈值分别设定为1 ℃和4%。将满足两个指标的传感器数量各记为$n_{1\text{-horizone}}$、$n_{2\text{-horizone}}$,结果如表4所示。

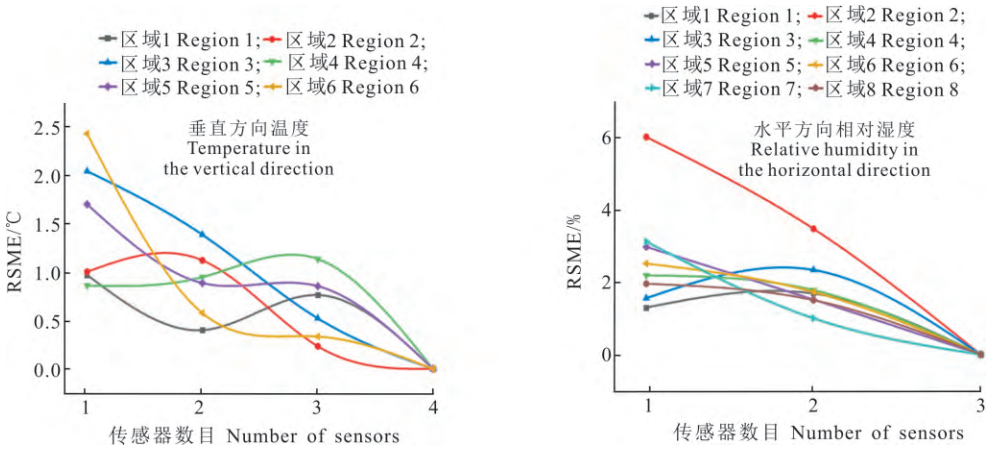


图5 RSME随传感器数目的变化趋势

Fig. 5 Variation trend of RSME with the number of sensors

表3 垂直方向上传感器数量选择

Table 3 Number of sensors in the vertical direction

区域 Region	温度 Temperature		相对湿度 Relative humidity		区域 Region	温度 Temperature		相对湿度 Relative humidity	
	n_1-vertical	n_2-vertical	n_1-vertical	n_2-vertical		n_1-vertical	n_2-vertical	n_1-vertical	n_2-vertical
1	1	1	1	1	4	1	1	1	2
2	1	1	1	1	5	1	2	1	1
3	1	2	1	2	6	1	2	1	1

2.4 烤房内传感器配置方案的确定

2.4.1 传感器最终优化配置选择 依据1.3.3节的传感器配置策略,以及基于表3和4确定的垂直、水平方向的传感器数量,结合优先级排序选定各区域传感器对象,并考虑位点重叠、监测误差和信息增益率要求,初步确定17个温湿度传感器,详见表5。

中国知网 https://www.cnki.net

表4　水平方向上传感器数量选择

Table 4　Number of sensors in the horizontal direction

区域 Region	温度 Temperature		相对湿度 Relative humidity		区域 Region	温度 Temperature		相对湿度 Relative humidity	
	n_1-horizone	n_2-horizone	n_1-horizone	n_2-horizone		n_1-horizone	n_2-horizone	n_1-horizone	n_2-horizone
1	1	1	1	1	5	1	1	1	1
2	1	1	1	2	6	1	2	1	1
3	1	2	1	1	7	1	1	1	1
4	1	2	1	1	8	1	1	1	1

表5　传感器综合配置方案

Table 5　Comprehensive sensor configuration scheme

项目 Project	配置方案 Configuration	
	温度 Temperature	相对湿度 Relative humidity
垂直方向 Vertical orientation	S13、S21、S5、S11、S8、S16、S4、S6	S1、S3、S5、S11、S2、S8、S4、S6
水平方向 Horizontal orientation	S5、S6、S11、S7、S8、S10、S13、S14、S16、S21、S22	S3、S4、S6、S11、S12、S13、S16、S21、S24
并集选择 Union selection	S13、S21、S5、S11、S8、S16、S4、S6、S7、S10、S14、S22	S1、S3、S5、S11、S12、S2、S8、S4、S6、S13、S16、S21、S24
综合配置 Comprehensive configuration	S1、S3、S5、S2、S4、S6、S11、S12、S10、S8、S7、S13、S16、S14、S21、S22、S24	

由表5可知，温度、相对湿度两个维度上各所需的传感器数量均为12个，依据式(9)确定的传感器最佳数量为12，即减少50%传感器数量冗余。将并集选择的传感器对象拆分为数量12的若干传感器集合，基于贝叶斯融合算法，将选定集合对象的温湿度数据进行融合，与同样融合后的实际工艺数据结果进行拟合，以均方根误差为评价指标，选择组合(S1、S5、S4、S6、S7、S8、S11、S16、S13、S14、S21、S24)为最终优化传感器配置，实际配置如图6所示。

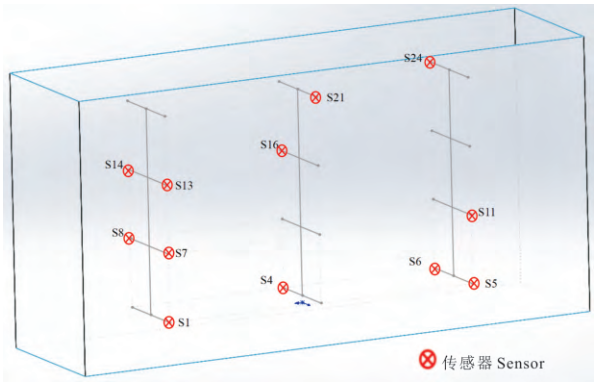


图6　烤房内传感器实际配置图

Fig. 6　Actual configuration diagram of sensors inside the curing barn

2.4.2 传感器配置策略的验证　依据传感器优化布局和传感器均匀分布阵列，图7展示优化前后温湿度曲线及优化后的温度趋势和实际烘烤工艺，其中温湿度数据平均绝对百分比误差(Mape)分别为3.9%和10%，结果显示均具有良好的拟合性。为了更好地验证配置策略的有效性，本研究将优化前后传感器配置效果进行了对比分析，结果如表6所示。由表6可以看出，优化后传感器方案在减少50%传感器数量的基础上，仅以RMSE=0.663 8的拟合误差实现对温湿度数据的准确重建，说明感知精度保持较高水平。同时，当选择传感器对象数量为12时，相对于优化前传感器数据，融合数据的温度、相对湿度数据信息增益率分别为0.018 2和0.001 8。上述结果表明，优化配置的数量及传感器对象选择策略符合预期研究成果。

3　讨　论

通过确定传感器优化配置策略，优化后传感器的分布特征表现为水平方向上集中于密集烤房前后部，左右两侧分布较为均匀；垂直方向上，顶棚传感器布置数量最少且位于中后部，而底棚分布的最多，以上结果表明传感器分布特征可能与烤房内部温湿度场分布特性[27]有关。

多传感器空间分布与烤房内部温湿度分布特性的一致性。研究者通过利用流体模拟、区域热湿环境数值等方法对烤房内部温湿度场分布进行探究，发现水平方向上烤房内部前中段温度较后端偏高，且中段相对湿度高于前后段；垂直方向上随着

中国知网　https://www.cnki.net

高度降低,相对温度逐渐下降,湿度逐渐增高[28-30],这与本研究发现密集烤房内部温湿度场存在非均匀性分布结果相同。结合前文讨论,证明优化后的传感器位点分布与烤房内温湿度分布特性保持强一致性,该分布实现了对烤房内部时变信息的全面感知及温湿度的局部极端数值和边缘信息的有效监测。

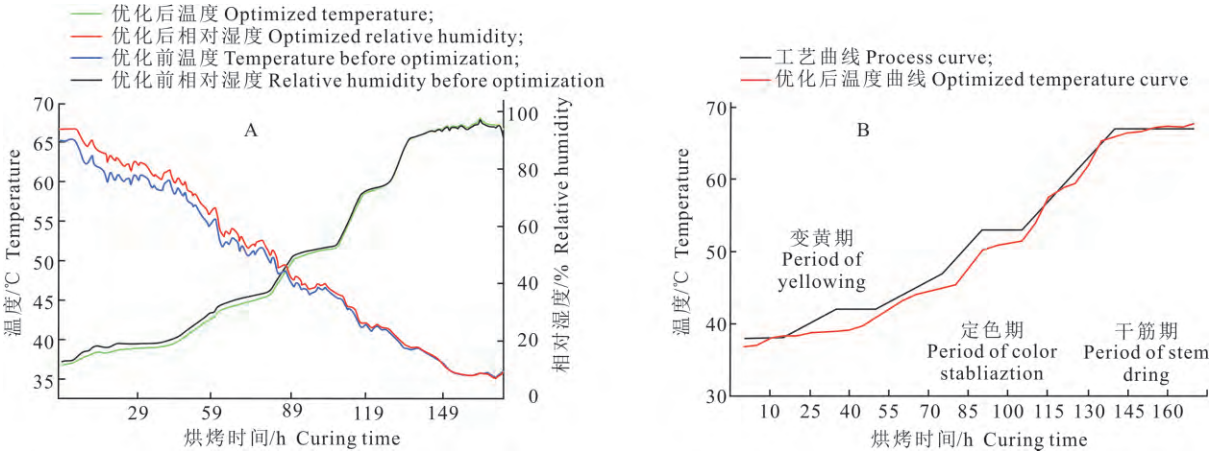


图 7 烤房内传感器优化配置效果比较

Fig. 7 Comparative analysis of sensor optimization configuration effects in curing barns

表 6 优化前后传感器配置性能对比

Table 6 Performance comparison of sensor configurations before and after optimization

配置方案 Configuration scheme	准确率 Accuracy	感知效率(信息增益率) Perception efficiency(Information gain ratio)		减少传感器冗余度/% Reduce redundancy (Number of sensors)
		温度 Temperature	相对湿度 Relative humidity	
传统方法 Traditional methods	0	0	0	0
优化配置 Optimized allocation	0.663 8	0.018 2	0.001 8	50

多传感器优化配置策略在考虑密集烤房的非均匀温湿度分布特性,反映不同位点温湿度时变信息的同时,兼顾获取整体趋势信息和增强信息丰度的双重目标。在降低 50% 传感器数量冗余条件下,为密集烤房内部各位点温湿度监测提供足够的基础数据,实现对烤房场景温湿度场的准确监测,并降低烟农劳动强度和经济成本,满足较好的装烟条件。

4 结 论

针对密集烤房多源异构传感器优化配置难题,本研究提出基于 HSIC 的密集烤房传感器优化配置策略,通过优先级排序和数量约束筛选关键点位,融合多源信息确定配置方案并验证有效性。具体结论如下。

1)从不同方向维度探究密集烤房内部温湿度场分布特性,表明其呈非均匀性分布,且不同高度、前后水平分布具有阶梯性,数据相关性较强但均值、中位数等指标存在差异。通过温湿度 2D 分布图可印证各区域间差异。

2)利用 HSIC 矩阵明确多传感器数据间的相对独立性,基于优先级排序算法和数量选择依据,引入数据融合算法,最终得到符合减少 50% 数量冗余目标的传感器优化配置方案:S1、S5、S4、S6、S7、S8、S11、S16、S13、S14、S21、S24。

3)采用上述综合配置方案,将优化前后的温湿度均值曲线和实际工艺曲线进行对比,结果显示均具有良好的拟合性。优化配置策略验证结果表明:融合数据 RSME 为 0.663 8,其中温湿度均值平均绝对百分比误差分别为 3.9% 和 10%,信息增益率为 0.018 2 和 0.001 8,均低于阈值,检验证明在密集烤房内部温湿度非均匀性分布情景下该传感器配置策略的有效性。

[参考文献]

[1] 宫长荣,潘建斌,宋朝鹏. 我国烟叶烘烤设备的演变与研究进展[J]. 烟草科技,2005,38(11):34-37.

中国知网 https://www.cnki.net

GONG C R, PAN J B, SONG Z P. Evolution of tobacco leaf flue-curing equipment in China[J]. Tobacco Science & Technology, 2005, 38(11): 34-37.

[2] 唐力为. 密集烤房中温湿度分布状况及其对烟叶化学和外观品质的影响[D]. 四川雅安：四川农业大学，2013.
TANG L W. Distribution of temperature and humidity in bulk curing barn and its influence on chemical and appearance quality of tobacco leaves[D]. Ya'an, Sichuan: Sichuan Agricultural University, 2013.

[3] 李昱霖，丁应福，王胜雷，等. 烤烟烘烤过程风机频率对叶温和烟叶变黄失水的影响[J]. 河南农业科学，2022, 51(3): 173-180.
LI Y L, DING Y F, WANG S L, et al. Influence of fan frequency on leaf temperature, yellowing and dehydration during tobacco bulk curing[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2022, 51(3): 173-180.

[4] 白志鹏. 基于CFD的新型密集烤房流场模拟及其结构优化[D]. 陕西杨凌：西北农林科技大学，2017.
BAI Z P. Flow field simulation and structural optimization for new bulk tobacco curing barn based on CFD[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2017.

[5] 陈祖销，张富生，过伟民，等. 基于物联网的烟叶烘烤温湿度数据采集分析与算法构建[J]. 烟草科技，2023, 56(10): 11-20.
CHEN Z X, ZHANG F S, GUO W M, et al. IoT-based acquisition and analysis algorithms for temperature and humidity data during tobacco flue-curing[J]. Tobacco Science & Technology, 2023, 56(10): 11-20.

[6] ZHOU X Z, DONG C L, ZHAO C P, et al. Temperature-field reconstruction algorithm based on reflected sigmoidal radial basis function and QR decomposition[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 171: 114987.

[7] WANG X D, WANG G J, CHEN H, et al. Real-time temperature field reconstruction of boiler drum based on fuzzy adaptive Kalman filter and order reduction[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2017, 113: 145-153.

[8] MA T, LIU Y Q, CAO C Y. Neural networks for 3D temperature field reconstruction via acoustic signals[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 126: 392-406.

[9] 付丽宇. 平菇栽植温室多点温度监测与优化配置研究[D]. 黑龙江大庆：黑龙江八一农垦大学，2019.
FU L Y. Study on multi-point temperature monitoring and optimal configuration of *Pleurotus ostreatus* planting greenhouse[D]. Daqing, Heilongjiang: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2019.

[10] 修晓波，李伯全，周峰. 基于遗传算法的温度传感器布置优化[J]. 电子科技，2021, 34(9): 17-23.
XIU X B, LI B Q, ZHOU F. Optimization of temperature sensor location loacation based on genetic algorithm[J]. Electronic Science and Technology, 2021, 34(9): 17-23.

[11] 孙小兵. 肉鸡舍环境监测及其与电晕放电耦合关系研究[D]. 山西太谷：山西农业大学，2021.
SUN X B. Research on environmental monitoring of broiler house and its coupling relationship with corona discharge[D]. Taigu, Shanxi: Shanxi Agricultural University, 2021.

[12] 侯娜. 变风量空调系统室内温湿度最佳测点研究[D]. 西安：西安建筑科技大学，2019.
HOU N. Research on optimal measuring point of indoor temperature and humidity in variable air volume air-conditioning system[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2019.

[13] 侯娜，闫秀英，王秀东. 基于CFD模拟的室内温湿度最佳测量位置研究[J]. 建筑热能通风空调，2020, 39(3): 88-91.
HOU N, YAN X Y, WANG X D. Research on optimal measurement position of indoor temperature and humidity based on CFD simulation[J]. Building Energy & Enviroment, 2020, 39(3): 88-91.

[14] 李鹰翔，沈慧华，于晓民. CFD仿真技术在博物馆温湿度控制中的应用[J]. 安装，2024(7): 72-75.
LI Y X, SHEN H H, YU X M. Application of CFD simulation technology in temperature and humidity control of museum[J]. Installation, 2024(7): 72-75.

[15] 高红菊，刘艳哲，陈莎. 基于改进K-means算法的WSN簇头节点数据融合[J]. 农业机械学报，2015, 46(S1): 162-167.
GAO H J, LIU Y Z, CHEN S. Fusion of WSN cluster head data based on improved K-means clustering algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(S1): 162-167.

[16] XIA S B, NAN X Y, CAI X, et al. Data fusion based wireless temperature monitoring system applied to intelligent greenhouse[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 192: 106576.

[17] 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): 43-55.
CHEN Z X, LI J Y, ZANG Z Y, et al. Temperature and humidity distributions and their influences on tobacco leaf quality in air ascending bulk curing barn[J]. Tobacco Science & Technology, 2024, 57(3): 43-55.

[18] 陈少滨，何健，宋朝鹏，等. 对密集烟叶烤房气流方向的分析和探讨[J]. 河北农业科学，2008, 12(11): 77-79.
CHEN S B, HE J, SONG Z P, et al. Analysis and discussion on airflow direction of bulk curing barn[J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2008, 12(11): 77-79.

[19] WANG T H, DAI X L, LIU Y. Learning with Hilbert-Schmidt independence criterion: a review and new perspectives[J]. Knowledge-Based Systems, 2021, 234: 107567.

[20] CARLOS-MANCILLA M, LÓPEZ-MELLADO E, SILLER M. Wireless sensor networks formation: approaches and techniques[J]. Journal of Sensors, 2016, 2016(1): 2081902.

[21] FENG L, DI T R, ZHANG Y W. HSIC-based kernel independent component analysis for fault monitoring[J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 2018, 178: 47-55.

[22] RUSTAMOV R M, KLOSOWSKI J T. Kernel mean embedding based hypothesis tests for comparing spatial point patterns[J]. Spatial Statistics, 2020, 38: 100459.

中国知网　https://www.cnki.net

[23] GRETTON A, BOUSQUET O, SMOLA A, et al. Measuring statistical dependence with Hilbert-Schmidt norms[C]// Algorithmic Learning Theory. Berlin, Heidelberg: Springer, 2005:63-77.

[24] PEI X Y, YI T H, QU C X, et al. Conditional information entropy based sensor placement method considering separated model error and measurement noise[J]. Journal of Sound and Vibration, 2019, 449:389-404.

[25] ZHANG J, LIN Z W, TSAI P W, et al. Entropy-driven data aggregation method for energy-efficient wireless sensor networks[J]. Information Fusion, 2020, 56:103-113.

[26] WANG X, MA J J, WANG S. Parallel energy-efficient coverage optimization with maximum entropy clustering in wireless sensor networks[J]. Journal of Parallel and Distributed Computing, 2009, 69(10):838-847.

[27] 杨树申,宫长荣,乔万成,等. 三段式烘烤工艺的引进及在我国推广实施中的几个问题[J]. 烟草科技, 1995, 28(3):35-37.
YANG S S, GONG C R, QIAO W C, et al. Introduction of three-stage baking process and several problems in its popularization and implementation in China[J]. Tobacco Science & Technology, 1995, 28(3):35-37.

[28] 李铮. 密集烤房装烟室内流场分析及其结构优化[D]. 武汉:华中科技大学, 2020.
LI Z. Flow field analysis and structure optimization in the tobacco chamber of bulk curing-barn[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2020.

[29] 刘兆宇,罗会龙,陈颐,等. 烟叶烘烤干筋期密集烤房热湿环境数值分析[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(1):160-165.
LIU Z Y, LUO H L, CHEN Y, et al. Numerical analysis of heat and humidity environment in dense curing barn during tobacco curing[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2021, 49(1):160-165.

[30] 单倩. 密集烤房烘烤过程中温度分布特点研究[D]. 合肥:安徽农业大学, 2015.
SHAN Q. The research of the temperature distribution characteristics during baking process in dense baking room[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2015.

(责任编辑:屈李纯)

中国知网 https://www.cnki.net