周健伟,魏泽彬,王树才,等.密闭式笼养蛋鸡舍秋季热环境数值模拟与优化[J].华中农业大学学报,2025,44(2):49-61.
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2025.02.006

密闭式笼养蛋鸡舍秋季热环境数值模拟与优化

周健伟[1],魏泽彬[2],王树才[1],龚东军[1,3]

1.华中农业大学工学院,武汉 430070; 2.华中农业大学动物科学技术学院、动物医学院,武汉 430070;
3.武汉软件工程职业学院(武汉开放大学),武汉 430205

摘要 为优化秋季纵向通风模式下的密闭式笼养蛋鸡舍热环境,通过计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)模拟当前蛋鸡舍的温度场、相对湿度场及空气流速场分布状况,对数值模型进行准确度验证,并通过17组正交仿真试验求解通风设备参数(前山墙隧道进气口导流板夹角θ_1、侧墙隧道进气口夹角θ_2、末端单个负压风机的通风量Q)处于3个不同水平时鸡笼区域的平均温度-湿度-风速指数(temperature-humidity-velocity index,THVI)及变异系数CV_{THVI}(coefficient of variation of THVI)。结果显示:笼间通道设置的24个验证点的温度、相对湿度和空气流速的平均相对误差分别为0.38%、0.52%、4.62%,数值模型准确度较高;而通风设备参数θ_1、θ_2、Q分别取值10°、90°、42 000 m³/h时,鸡笼区域气流场平均THVI和变异系数CV_{THVI}分别为25.65和1.64%,相较原通风方案分别下降1.61%和23.93%,有利于提升蛋鸡舍鸡笼区域的热环境适宜度及均衡性。

关键词 笼养蛋鸡舍; 数值模拟; 热环境; 温度; 相对湿度; 气流速度
中图分类号 S817.3 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2025)02-0049-13

密闭式笼养鸡舍具有高集约化、高效率等特点,能提升土地资源利用率,易保持舍内空气环境的相对稳定,现已成为我国蛋鸡与肉鸡产业的标准化规模养殖方向[1]。为了有效调节舍内热环境舒适度,密闭式笼养式鸡舍常采用由含隧道进气口、通风侧窗以及负压风机组成的隧道式通风系统[2]。在夏季、初秋炎热气候常采用纵向通风模式,即关闭通风侧窗,开启末端负压风机和鸡舍前端的隧道进气口,借助流场压差更新舍内空气并及时将蛋鸡产生的多余热量、水汽及污染物从鸡舍末端排出[3]。

标准蛋鸡舍长度往往超过50 m,在前端集蛋装置、末端清粪装置及笼具等设施的阻碍作用下,舍内空气流动不畅、通风效率低、气流场热环境不均匀等问题较突出[4]。近年来,部分学者开始利用计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)模拟密闭式禽舍内的空气流场,并进行数值模拟优化试验,在节省试验周期及成本的同时为优化舍内结构和控制策略提供参考。程琼仪等[5]模拟了层叠式笼养蛋鸡舍进气口位置对夏季舍内温度和气流分布的影响,结果表明进气口位置应尽量靠近山墙且偏离鸡笼区域,以减少舍内的通风弱区。江晓明等[6]模拟研究了秋季半阶梯笼养蛋种鸡舍采用过渡通风模式时,通风侧窗导流板夹角对舍内温度场、气流场均匀性的影响,建议日间和夜间通风侧窗导流板角度分别为67.5°与45°。董耀宗等[7]分析了散热风机进风角度对阶梯笼养雏鸡舍供暖效果的影响,结果表明45°进风角度有助于改善鸡笼区域气流场、温度场的分布均匀性。Tong等[8]模拟了多层鸡笼鸡舍的气流场热环境及热应力分布,评估不同季节的热应激和冷应激情况,结果显示,在夏、秋、冬季分别有69.1%、78.0%和18.4%的鸡笼出现热应激,冬季另有18.3%鸡笼出现冷应激。欧美国家流行平养模式,目前针对国内常见的笼养鸡舍的气流场热环境CFD数值模拟研究尚处于起步阶段,且现有研究主要针对夏、冬季,对于春、秋过渡季节研究甚少;且未见针对蛋鸡舍纵向通风模式下隧道进气口和末端风机的不同状态对舍内热环境的组合影响分析研究。

针对现有不足,本研究对秋季早期蛋鸡舍纵向通风模式下的气流场热环境数值进行模拟与优化,主要针对空气流速、温度和相对湿度3个热环境因素

收稿日期: 2025-01-07
基金项目:2024年湖北省科技人才服务企业项目(2024DJC024)
周健伟,E-mail:1254825924@qq.com
通信作者: 王树才,E-mail:wsc01@mail.hzau.edu.cn

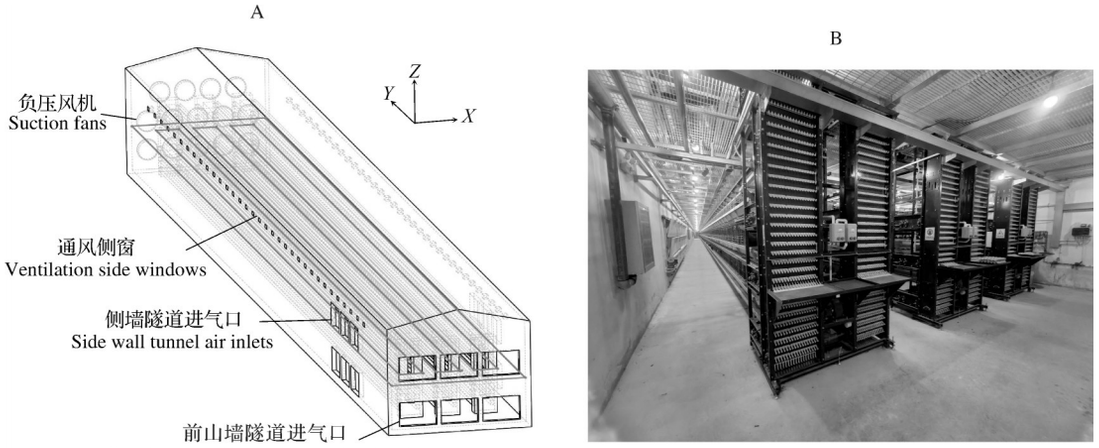
进行测量分析。在建立试验蛋鸡舍CFD模型并经过准确性验证后，分析前端山墙隧道门进气口、两侧墙隧道门进气口和末端负压风机处于不同运行状态时，鸡笼区域对应的热环境适宜度和均匀性，并利用正交仿真实验寻找其最优运行状态组合，旨在为改善蛋鸡舍气流场热环境提供一定技术参考。

1 材料与方法

1.1 蛋鸡舍原型

本研究的试验蛋鸡舍位于湖北省京山市罗店镇（北纬31°4′2″，东经113°15′15″）。鸡舍为轻钢结构的全密闭蛋鸡舍，长82 m，宽9 m，东西走向且前山墙位于东侧，鸡舍包括上、下两层空间，由金属格栅网板相间隔。鸡舍山墙屋檐高6.8 m，屋脊高7.8 m。鸡舍墙体为烧结砖，地面铺设混凝土，舍顶采用蓝色彩钢板密封并使用聚苯乙烯夹芯板隔热。鸡舍采用负压式机械通风系统保证舍内空气流通，靠西的后山墙上安装有3排共14台可调负压风机（单台风机直径1.3 m，最大通风量42 000 m^3/h），底层风机安装高度为0.6 m，相邻两风机的纵向中心距为1.9 m。前山墙与左右两侧墙在鸡舍上、下层空间各布置有3个配备可调节导流板的隧道进气口，可在0～90°范围内调节进气气流入射角度。前山墙进气口对称于鸡舍横向中轴线布置，尺寸为2.5 m×1.6 m，下层进气口布置高度为0.25 m，上下两层进气口纵向间距1.4 m；两侧墙的隧道进气口布置高度为0.3 m，首个隧道进气口前端距东山墙9 m。此外，两侧墙上方靠近屋檐处均设有34个0.54 m×0.26 m的矩形通风侧窗，侧窗布置高度为5.45 m，横向间距为2.06 m，首个侧窗前端距东端山墙6.75 m。

舍内设有6层3列的层叠式鸡笼，包含共18个长方体状的独立鸡笼区域。独立笼具区域长度为72.24 m，高度为0.4 m，鸡笼层间距为0.3 m。每个独立鸡笼区域被划分为2×344个笼格，单格容纳1只黑羽绿壳蛋鸡，上、下层空间各含4个1.1 m宽走廊；笼具采用粪带自动清粪，料槽采用料车行车布料，配备自动集蛋装置和供水系统，上、下层空间均安装LED照明灯具。鸡舍整体布局如图1所示。



A：整体结构简图 Overall structural diagram；B：内部场景图 Internal scene diagram.

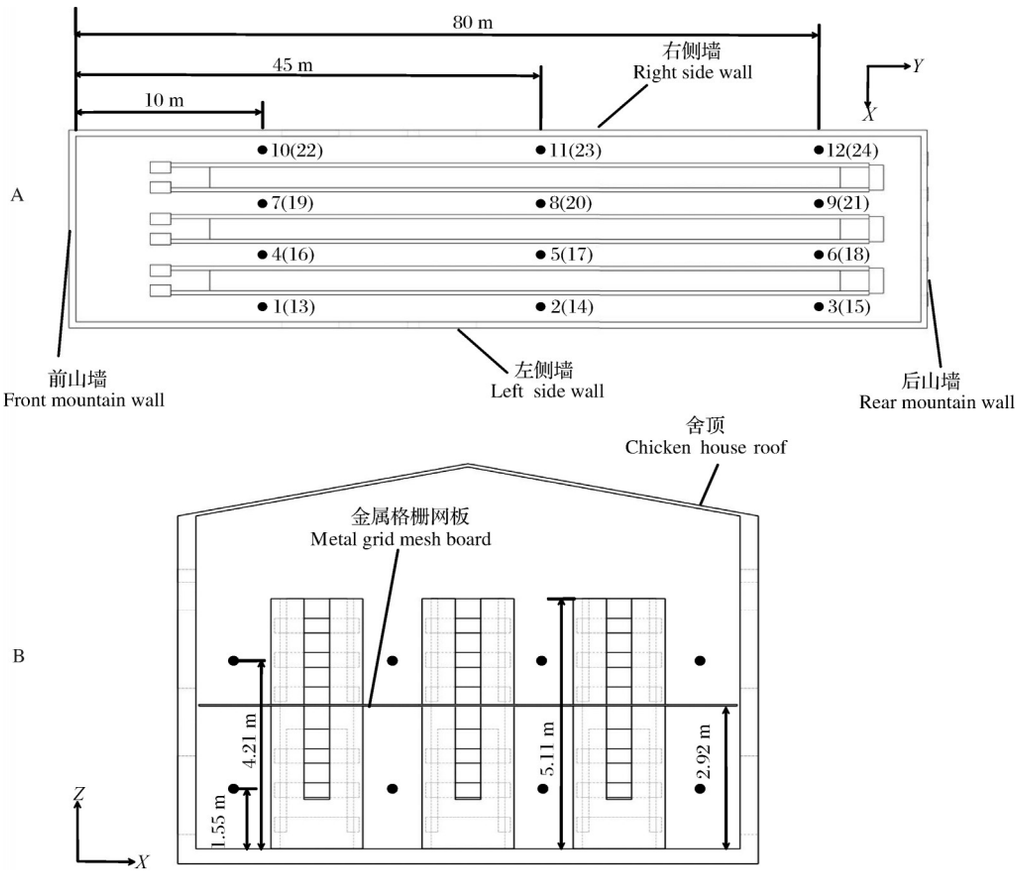
图1 鸡舍整体布局

Fig.1 Overall layout of chicken house

1.2 蛋鸡舍气流场热环境数据采集

试验时间为2024年10月9日—10月15日，在当地属于早秋，选取每天中午13:00—15:00测量舍内的空气流速、温度和相对湿度，此时段的舍外气温平稳，且蛋鸡已基本完成采食活动，舍内无其他人员出入，在此阶段舍内气流场热环境状态较稳定。试验过程中采用热红外测温仪（标智GM1350，分辨率0.1 ℃，精度±1.5 ℃）和热电偶测温仪（UNI-T UT320D，分辨率0.1 ℃，精度±0.5%）测量围护结构的多点温度并计算平均值，其中对左、右侧墙选取12个测量点，舍内上、下层空间各6个；山墙选取6个测量点，舍内上、下层空间各6个；舍顶和地面选取12个测量点，其投影点均匀分布在笼间通道。此外为验证后续数值模型的准确度，在舍内上、下层空间的中间层鸡笼所在的Z=4.21 m平面和Z=1.55 m平面上各选12个验证点，其位置分布如图2所示。采用热线风速仪（鑫斯特HT9829，分辨率0.01 m/s，精度量程±1%）测量验证点和隧道进气口的风速，采用温湿度测量仪（德力西THM01，温度分辨率0.1 ℃，精度±0.3 ℃；相对湿度分辨率0.1%，精度±3%）测量验

证点和隧道进气口的相对湿度。经过 7 d 的测量和前期预试验，10 月 12 日的气流场热环境接近平均水平且具有季节代表性，用于进行模型的边界条件创建和准确性验证。



A：鸡舍俯视视角 Top view angle of chicken house；B：鸡舍前视视角 Front view angle of chicken house.

图 2　验证点分布示意图

Fig.2　Schematic diagram of verification point distribution

1.3　蛋鸡舍 CFD 数值模拟研究

1）几何模型建立。使用 Ansys SpaceClaim 对试验鸡舍进行等比例的全尺寸几何建模，为防止生成的网格模型过分冗杂，简化舍内的清粪带、集蛋带、饮水器、饲喂器和照明灯具等对气流场影响微小的几何结构。考虑笼具和笼内鸡群对气流流动的阻碍作用，等效为 18 个含阻力系数的长方体多孔介质区域（porous media zone）。

2）网格划分。采用 Ansys Fluent Meshing 对鸡舍模型计算域进行 Poly-Hexcore 网格离散，对气流进口与风机出口附近网格局部加密。为平衡鸡舍网格模型的精度和求解效率，本研究共设计了 3 种单元尺寸的网格模型，分别记为粗、中、细网格模型。粗网格模型作为基准尺寸模型，其网格数量采用 Nielsen 经验公式[9]进行估算。

$$N = 44400 \times V^{0.38} \tag{1}$$

式（1）中，N 为估算的基准网格数量；V 为鸡舍建筑体积，m^3。

使用式（1）计算，划分的粗网格模型数量为 1 162 270，改变网格基准尺寸实现网格细化，得到中、细网格，进行网格划分的数量分别为 1 788 243、2 534 166；最差的网格纵横比均小于 10，最差的网格正交质量系数均大于 0.4。在舍内纵向中间位置 Y=41 m 处建立监测面，以细网格模型中监测面的面积加权平均空气流速为基准，粗、中网格模型的相对差异结果如表 1 所示。其中，中网格模型方案相对细网格模型相对差异仅为 0.33%，满足仿真要求。

3）控制方程。舍内空气流场的流动规律遵循基本守恒方程，包括能量守恒方程、质量守恒方程和动量守恒方程；此外，为描述舍内的水汽扩散规律，引入基于组分质量分数的输运方程，上述方程可表示为式（2）形式[10]。

$$\frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u_j\varphi)}{\partial x_j}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\Gamma_\varphi\frac{\partial\varphi}{\partial x_j}\right)+s_\varphi \tag{2}$$

式(2)中,ρ为密度,kg/m^3;φ为通用变量;t为时间,s;x_j为流体的空间位置坐标,其中j为空间位置索引,取值对应鸡舍三维方向;u_j为流体在x_j方向的速度分量,m/s;Γ_φ为有效扩散系数;s_φ为描述守恒量生成、消耗或转化速率的源项。

表1 网格独立性检验结果

Table 1 Grid independence test results

网格模型 Grid models	网格单元数量 Number of grid cells	监测面平均空气流速/(m/s) Average air flow velocity on the monitoring surface	相对差异/% Relative difference
粗网格模型 Coarse mesh model	1 162 270	0.653	7.75
中网格模型 Medium grid model	1 788 243	0.608	0.33
细网格模型 Fine grid model	2 534 166	0.606	0

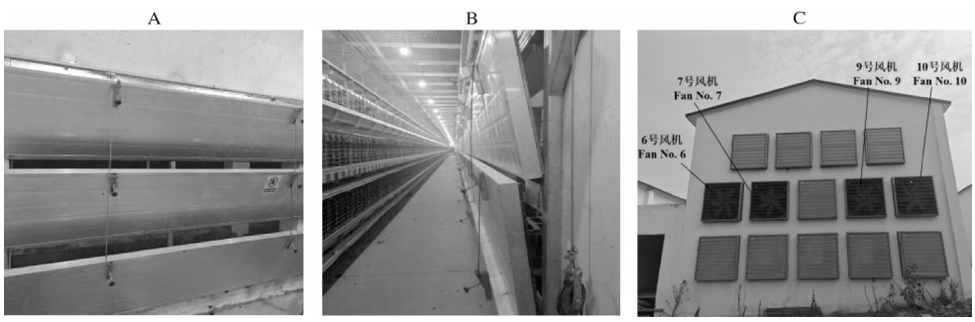
试验期间,鸡舍内无其他人员作业,负压风机持续稳定运行,可视舍内气流场为稳定流动状态;舍内压力波动小,可视为不可压缩;将舍内局部温差引起的空气密度变化视为线性函数包含于动量方程的热浮力项中,符合Boussinesq假设[11]。为判断舍内气流场流型,实测舍内通风量计算舍内横截面平均气流流速,由经验公式(3)估算Re约为38 882,远大于湍流判断值4 000,因此将舍内气流流型视为湍流。

$$\mathrm{Re}=\frac{\rho v d}{\mu} \tag{3}$$

式(3)中,Re为雷诺数;ρ为空气密度,kg/m^3;v为蛋鸡舍内横截面平均气流流速,m/s;d为蛋鸡舍内空间横截面当量直径,m;μ为舍内空气动力粘度,Pa·s。

Bjerg等[12]证明k-ε湍流模型最适用于畜禽舍内的湍流建模;而相比标准的k-ε湍流模型,本研究选择具有更高精度的RNG k-ε湍流模型进行数值模拟[13];此外提出以下假设:(1)重力加速度取为9.81 m/s^2;(2)隔热保温条件良好。

4)边界条件。试验期间鸡舍采用纵向通风模式,各通风设备状态如图3所示。当前通风方案下仅开启第2排两侧编号为6、7、9、10的4台负压风机,将它们视为速度入口,流速根据当前实际通风量计算,为8.37 m/s,速度矢量方向垂直于山墙平面指向舍外;视其他关闭的负压风机为壁面。视隧道进气口为静压为0的压力进口,温度、相对湿度由3次实测平均。此期间前山墙的隧道进气口角度为30°,左、右两侧墙的隧道进气口角为15°。将地面、屋顶及山墙、侧墙的其他区域视为恒温的无滑移壁面,水蒸汽在壁面不凝结;将同一墙体视为等温壁面,温度由各墙体内表面各位置实测平均值确定。鸡舍气密性良好,试验期间舍门关闭,模型内除气流进、出口的其他区域视为无泄漏,包括关闭的通风侧窗区域,具体边界条件设置如表2所示。



A:前山墙隧道进气口及导流板Front mountain wall tunnel inlet and guide plate;B:侧墙隧道进气口及导流板Side wall tunnel air inlet and guide plate;C:后山墙负压风机Rear mountain wall negative pressure fan.

图3 纵向通风模式下运行的通风设备

Fig.3 Ventilation equipment operating in vertical ventilation mode

5)多孔介质区域。将各鸡笼区域视为多孔介质区域以替代对蛋鸡身体的几何建模。考虑笼内鸡群对空气流动的阻碍作用,在3个方向的动量方程中添加由黏性损失项部分、惯性损失项组成的损失源项S_i[14],由蛋鸡平均体质量1.1 kg估算孔隙率为0.87。对鸡笼区域进行虚拟风洞试验,拟合风洞入口空气流速与单位长度的压降曲线,根据待定系数法求取阻力系数。根据蛋鸡日常姿态建立的鸡笼区域虚拟风洞面网格模型如图4所示。

$$S_i=-\left(\sum_{j=1}^{3}D_{ij}\mu v_j+\frac{1}{2}\sum_{j=1}^{3}C_{ij}\rho|v|v_j\right) \tag{4}$$

式(4)中,D_{ij}为鸡笼区域三方向的黏性阻力系数,m^{-2};v_j为鸡笼区域三方向的气流速度矢量,m/s;C_{ij}为鸡笼区域三方向的惯性阻力系数,m^{-1};μ为空气

表 2　鸡舍数值模拟边界条件

Table 2　Numerical simulation boundary conditions of chicken house

边界名称 Boundary names	边界类型 Boundary types	边界参数 Boundary parameters	参数取值 Parameter values
隧道进气口 Tunnel air inlets	压力入口 Pressure inlet	表压/Pa Gauge pressure	0
		温度/℃ Temperature	25.6
		相对湿度/% Relative humidity	43.3
负压风机 suction fans	速度入口 Velocity inlet	空气流速/(m/s) Airflow velocity	−8.37
		温度/℃ Temperature	26.6
舍内顶部 Top of the building	无滑移壁面 o slip wall surface	温度/℃ Temperature	26.9
舍内地板 Floor of the building			24.7
舍内前山墙 Front mountain wall of the building			25.1
舍内后山墙 Rear mountain wall of the buildin			26.4
舍内左侧墙 Left side wall of the building			25.9
舍内右侧墙 Right side wall of the building			26.0
鸡笼区域 Chicken cage area	多孔介质 Porous media	产热率/(W/m³) Heat generation rate	92.18
		产水汽率/[g/(s·m³)] Water-vapor production rate	0.008 169
		X-黏性阻力系数/m⁻² *X*-viscous drag coefficient	347 1
		Y-黏性阻力系数/m⁻² *Y*-viscous drag coefficient	532 7
		Z-黏性阻力系数/m⁻² *Z*-viscous drag coefficient	115 64
		X-惯性阻力系数/m⁻¹ *X*-Inertial drag coefficient	0.14
		Y-惯性阻力系数/m⁻¹ *Y*-Inertial drag coefficient	1.03
		Z-惯性阻力系数/m⁻¹ *Z*-Inertial drag coefficient	1.27

的动力粘度，Pa·s；ρ为空气密度，kg/m³；$|v|$为气流速度的大小，m/s。

其中空气动力黏度、空气密度选取室内多点平均温度 25.5 ℃下的估计值 1.85×10^{-5} Pa·s 与 1.184 kg/m³，得到鸡笼区域X、Y、Z 3个方向的入口空气流速与单位长度压降的拟合表达式分别为：

$$\frac{\Delta P}{\Delta x}=0.829v_x{}^2+0.0642v_x,\ \frac{\Delta P}{\Delta y}=0.6098v_y{}^2+0.0986v_y$$

及 $\frac{\Delta P}{\Delta z}=0.7518v_z{}^2+0.2139v_z$。此外，视上述鸡笼区域为蛋鸡的产热、产湿区域，其总产热量Q_t、显产热量Q_s、产湿量G_w根据国际农业和生物系统工程委员会(CIGR)推荐的经验公式进行估算[15]。

$$Q_t=(6.28m^{0.75}+25Y)\times\frac{(1000+20\times(20-t)}{1000} \tag{5}$$

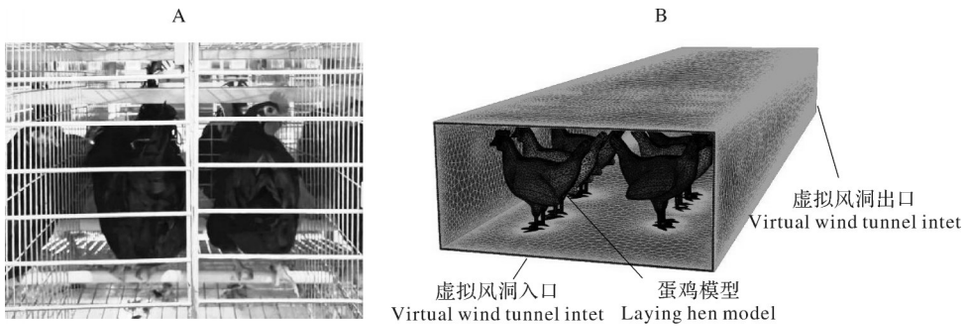
$$Q_s=\frac{(6.28m^{0.75}+25Y)\times670+13.4\times(20-t)-9.8\times10^{-8}\times t^6}{1000} \tag{6}$$

$$G_w=\frac{Q_l}{L}=\frac{Q_t-Q_s}{L} \tag{7}$$

式(5)～(7)中，m是蛋鸡的平均体质量，kg；Y是蛋鸡的平均产蛋量，kg/d；t是隧道进气口温度，℃；Q_l是蛋鸡的潜产热量，W；W是水蒸气的汽化潜热，kJ/kg。

蛋鸡舍上层空间铺设金属格栅网板，便于工作人员行走并保证上、下层空间的空气可充分地流通交换，如图 5 所示，根据实测尺寸计算出孔隙率约为 0.94，同样视为多孔介质区域。建立网格模型如图 4 所示，利用前述方法求取其X、Y、Z 3个方向的黏性阻力系数分别为 2 573、1 941、21；惯性阻力系数分别为 0.17、0.13、0.02。

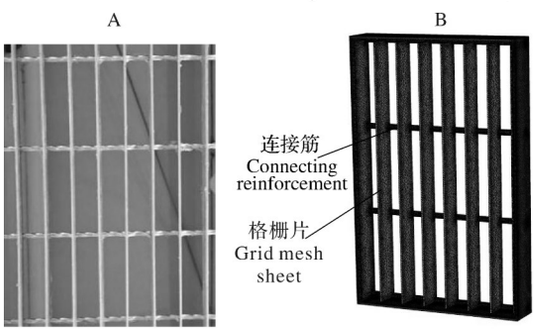
6)数值求解方法。使用 ANSYS Fluent Soluton 求解器基于 FVM 对鸡舍离散网格模型计算域进行数值求解，其中湍流数值模拟方法为 RANS，即对动量方程的求解方法为 Reynolds-Average 形式。选择 SIMPLE 算法进行压力-速度耦合，其中压力项、动量项、能量项和组分项的离散格式为二阶迎风格式；湍流动能项、湍流耗散率项为一阶迎风格式，监测舍内靠近侧墙隧道进风口处 Y=9.1 m 平面的温度与空气流速的面积加权平均值曲线，直至其平稳后视为模型收敛并停止迭代。



A:笼内蛋鸡姿态 The posture of laying hens in the cage;B:虚拟风洞网格模型 Face grid model of virtual wind tunnel.

图4 鸡笼区域多孔介质模拟

Fig.4 Simulation of porous media in chicken cage area



A:网板实际状态 Actual status of the mesh board;B:虚拟风洞网格模型 Grid model of virtual wind tunnel.

图5 金属格栅网板多孔介质模拟

Fig.5 Simulation of porous media of metal grid mesh board

2 结果与分析

2.1 CFD模拟结果验证

图6所示为24个验证点的温度、相对湿度、空气流速的模拟值与实测平均值对比结果，可见各验证点的热环境参数实测值与模拟值大小趋势基本吻合。使用式(8)计算各验证点的热环境参数实测值平均相对误差e_R，温度、相对湿度、空气流速模拟值与测量值的平均相对误差e_R分别为0.38%、0.52%、4.62%。由于空气流速数值较低，导致对应的e_R结果略大，但所有验证点中空气流速的绝对误差最大值仅为0.062 m/s，因此，该CFD数值模型具有较高的可信度[16]。

$$e_R=\sum_{i=1}^{24}\frac{|C_{si}-C_{mi}|}{C_{mi}} \tag{8}$$

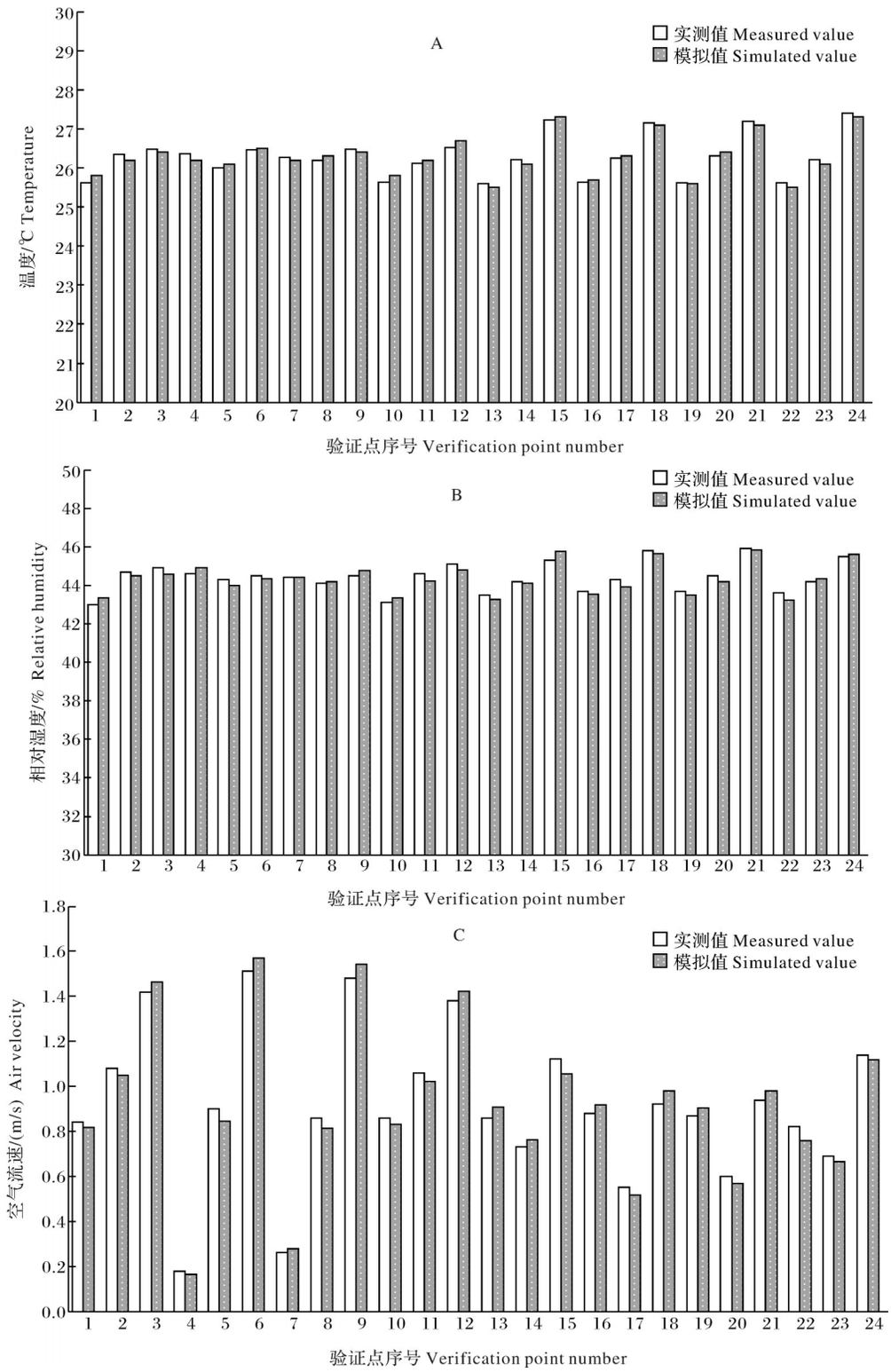
式(8)中，C_{si}为各验证点的温度、相对湿度、空气流速模拟值，℃、%、m/s；C_{mi}为验证点的温度、相对湿度、空气流速实测值，℃、%、m/s。

2.2 舍内气流场热环境分布特点

为观察试验蛋鸡舍的气流场热环境空间分布特点，由东山墙起沿蛋鸡舍长度方向依次选取3个垂直于Y轴的参考平面，分别标记为Y_1=9.1、Y_2=52.1、Y_3=73.9 m，其中Y_1位于蛋鸡舍前端侧墙进气口中间位置，该位置空气流动情况较复杂；Y_2位于鸡舍中后端，在前期预试验中表现出较高的温度、相对湿度；Y_3位于蛋鸡舍鸡笼末端位置，是最靠近负压风机的蛋鸡生活区；在高度方向，将鸡舍下层空间、上层空间鸡笼区域的中间层(第2层、第5层)中心平面分别标记为Z_1=1.55 m和Z_2=4.21 m。上述参考平面用于建立气流场热环境参数云图，各平面在鸡舍中的位置分布如图7所示。

1)空气流速分布分析。由试验蛋鸡舍内的空气流速分布云图(图8)可见，鸡舍内的气流场大致对称于鸡舍中轴X=0 m平面，其中流速最高的位置集中于鸡舍末端负压风机附近，局部流速达2.47 m/s。而第6层鸡笼至舍顶的空旷区域流动阻力较小，空气流速亦较高，为0.98~1.25 m/s；Y_1、Z_1、Z_2平面流速云图显示，从两侧墙隧道进气口流入的新鲜空气在导流板作用下，贴附于两侧墙面上升并于天花板附近交汇，部分气流反射至中间列鸡笼顶层及其两侧的笼间通道上方，因此，该部分流速可达0.86 m/s；此后气流与前山墙隧道进气口进入的空气混合，并在风机负压作用下运动至鸡舍末端。由于笼具和笼内蛋鸡的阻碍，笼间通道区域和鸡笼区域存在明显的流速差，其中鸡舍中前端的局部流速差达0.48~0.78 m/s。此外，在鸡舍前端1.15~5.35 m范围内存在部分空气流动滞区，主要是前端集蛋装置的矩形平面阻挡了气流流动。

2)温度分布分析。图9所示为试验蛋鸡舍内的温度分布云图，其中位于鸡舍上层空间的Z_2平面较下层空间的Z_1平面平均温度更高，分别为26.42和26.21 ℃。由图9可见，温度分布沿着鸡舍Z轴正向



A：温度对比结果 Temperature comparison results；B：相对湿度对比结果 Relative humidity comparison results；C：空气流速对比结果 Airflow velocity comparison results.

图 6　温度、相对湿度和空气流速测试值与模拟值对比

Fig.6　Comparison between measured values and simulated values

呈升高趋势，第 6 层鸡笼区域附近达 27.25～27.87 ℃的极大值，这是由于上层空间靠近舍顶，在试验开始前承载更高的日光负荷[17]；而第 6 层鸡笼区域上方温度骤降，这是因为该部分区域的高空气流速能够

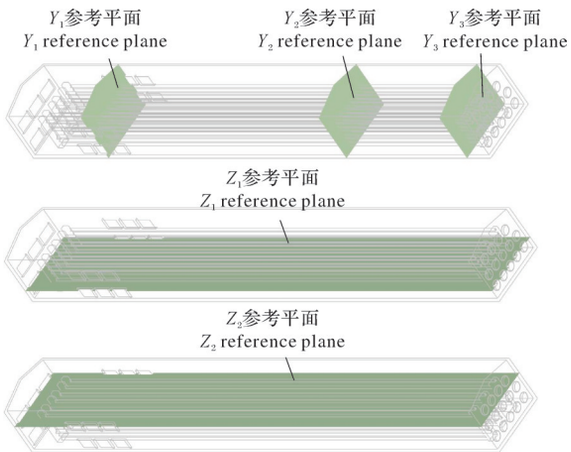


图7 参考平面位置

Fig.7 Reference planes position

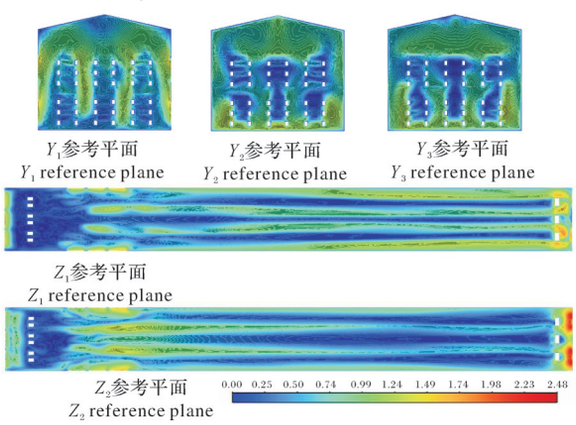


图8 空气流速分布云图

Fig.8 Cloud map of airflow velocity distribution

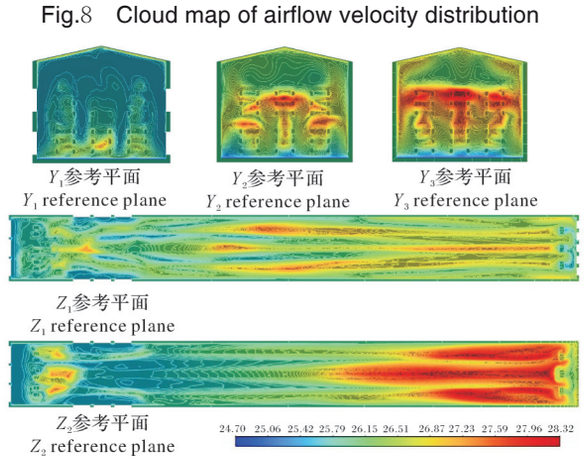


图9 温度分布云图

Fig.9 Cloud map of temperature distribution

迅速将舍内多余热量排出鸡舍。

3)相对湿度分布分析。由试验蛋鸡舍内的相对湿度分布云图(图10)可见,相对湿度分布和温度分布具有较明显的正相关性,鸡笼区域的相对湿度高于笼间通道区域以及天花板下的顶层空间,且沿鸡舍Y方向的后端空间相对湿度高于前端空间。这是因为蛋鸡的呼吸作用会伴随产生水汽,而鸡笼区域气流速度较低,无法及时排出舍内的水汽会在鸡舍后端滞留,形成相对湿度更高的区域。

综上,由于试验蛋鸡舍结构的固有特点,舍内不同位置的热环境质量水平存在差异,且存在可优化空间。

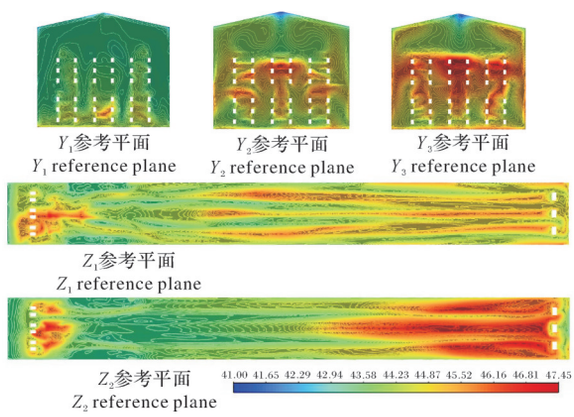


图10 相对湿度分布云图

Fig.10 Cloud map of relative humidity distribution

2.3 舍内热环境优化分析

当前季节试验蛋鸡舍采用纵向通风模式,通过调整通风设备的运行状态可执行不同通风方案,即调节负压风机通风量、各隧道进气口的导流板夹角,从而改变新鲜空气进入舍内后的流动组织路径,实现对蛋鸡生活区域的热环境调节。

温度、相对湿度、空气流速都会影响蛋鸡舍内热环境质量[18],为考虑上述3个参数对鸡笼区域热环境舒适度的综合影响,本研究选择使用Tao等[19]提出的温度-湿度-速度指数(THVI,公式中表示为I_{THV})作为热环境舒适度的评价指标,其表达式为:

$$I_{\mathrm{THV}}=(0.85t_{\mathrm{db}}+0.15t_{\mathrm{wb}})\times v^{-0.058} \tag{9}$$

式(9)中,t_{ab}是舍内环境干球温度,℃;t_{wb}是舍内环境湿球温度,℃;v是空气流速,m/s。

1)正交仿真试验。本研究利用Design Expert 12和ANSYS Fluent进行正交仿真试验。试验设计为3因素3水平Box-Behnken试验,响应值为舍内鸡笼区域的体积加权平均温度-湿度-速度指数,记作I_{THV}。3因素对应3个通风设备的运行状态,即前隧道进气口导流板夹角、侧墙隧道进气口导流板夹角、运行的负压风机通风量。3水平能够更好地覆盖各因素的取值范围并捕捉与响应值之间的非线性关系,且Box-Behnken设计相较全因素设计能以较少试验次数获取准确度高的响应模型。

由于鸡舍建筑沿X=0 m中轴面对称，左、右侧墙的隧道进气口导流板被设定为一体控制，前山墙的隧道进气口导流板及后山墙负压风机组受独立控制。将前山墙的隧道进气口导流板夹角编码为正交试验因素θ_1，两侧墙的隧道进气口导流板夹角统一编码为试验因素θ_2，后山墙运行的4台负压风机的单个通风量编码为试验因素Q。视隧道进气口导流板夹角开启后的最大值90°和最小值10°为因素θ_1和因素θ_2共同的水平最大值、最小值；当前单个负压风机通风量为40 000 m³/h，将可调最大通风量42 000 m³/h和现通风量的对称取值38 000 m³/h视为因素Q的水平最大值、最小值，覆盖试验鸡舍秋季常用通风量取值范围。

使用ANSYS Fluent进行17组仿真试验，除改变试验因素θ_1、θ_2、Q的取值外，保证其他建模步骤、求解方案与验证的试验方法一致，每组仿真试验重复3次，取I_{THV}平均值的标准差<0.5作为收敛判据，得到通风设备处于不同状态下的$\overline{I_{THV}}$结果（表3）。

表3　正交仿真试验设计及结果

Table 3　Orthogonal simulation experiment design and results

试验序号 Test No.	前山墙进气口导流板夹角θ_1/(°) Front mountain wall inlet angle	侧墙进气口导流板夹角θ_2/(°) Side wall intake angle	单个负压风机通风量 Q/(m³/h) Ventilation rate of a single fan	$\overline{I_{THV}}$
1	50	90	42 000	25.71
2	90	50	38 000	26.27
3	10	50	42 000	25.92
4	50	50	40 000	25.95
5	50	50	40 000	25.95
6	90	90	40 000	25.83
7	50	90	38 000	25.98
8	50	50	40 000	25.95
9	50	50	40 000	25.95
10	10	10	40 000	26.14
11	10	50	38 000	26.28
12	50	50	40 000	25.95
13	50	10	38 000	26.17
14	90	50	42 000	25.71
15	50	10	42 000	25.77
16	10	90	40 000	25.82
17	90	10	40 000	25.92

在Design Expert 12中使用三元二次多项式拟合上述因素θ_1、θ_2、Q与响应值$\overline{I_{THV}}$的函数关系，所得到的拟合表达式为：

$$\overline{I_{THV}}=44.7125+0.0182656\theta_1-0.0151094\theta_2-8.38437\times10^{-4}Q+3.59375\times10^{-5}\theta_1\theta_2-6.25\times10^{-7}\theta_1Q+4.0625\times10^{-7}\theta_2Q+3.59375\times10^{-5}{\theta_1}^2-5\times10^{-5}{\theta_2}^2+9.375\times10^{-9}Q^2 \quad (10)$$

表4　拟合表达式模型方差分析

Table 4　Variance analysis of fitting expression model

来源 Source	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	均方 Mean square	F值 F-values	P值 P-value
模型 Model	0.465 5	9	0.051 7	32.84	＜0.000 1
θ_1	0.023 1	1	0.023 1	14.67	0.006 5
θ_2	0.054 4	1	0.054 4	34.57	0.000 6
Q	0.316 0	1	0.316 0	200.64	＜0.000 1
$\theta_1\theta_2$	0.013 2	1	0.013 2	8.40	0.023 1
θ_1Q	0.010 0	1	0.010 0	6.35	0.039 8
θ_2Q	0.004 2	1	0.004 2	2.68	0.145 5
${\theta_1}^2$	0.013 9	1	0.013 9	8.84	0.020 7
${\theta_2}^2$	0.026 9	1	0.026 9	17.11	0.004 4
Q^2	0.005 9	1	0.005 9	3.76	0.093 7
残差 Residual	0.011 0	7	0.001 6	32.84	
总和 Sum	0.476 6	16			

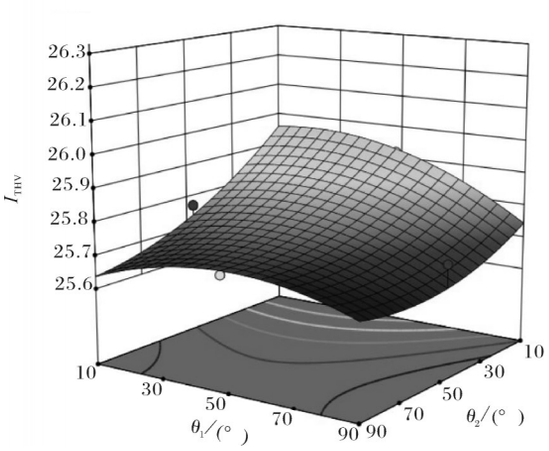


图11　因素θ_1和θ_2交互作用的响应曲面

Fig.11　Response surface of the interaction between factors θ_1 and θ_2

表4为上述拟合表达式的方差分析结果，其中表达式模型P<0.000 1，证明该模型对响应值$\overline{I_{THV}}$具有极显著的拟合效果；决定系数R^2=0.976 9，说明预测值和实际值具有高相关性，可利用该模型预测不同水平组合下试验因素的响应值。其中表达式(10)中的一次项均表现为显著(P<0.05)，根据其平方和(SS)判断各一次项对$\overline{I_{THV}}$影响力从大到小排序为：单个负压风机的通风量Q>两侧墙的隧道进气口导流板夹角θ_2>前山墙的隧道进气口导流板夹角θ_1。二次项中，${\theta_1}^2$与${\theta_2}^2$均表现为显著，Q^2不显著。交互

项中，$\theta_1\theta_2$影响力较大，原因主要是二者决定了舍外空气进入蛋鸡舍的流动迹线，从而影响鸡舍前端新鲜空气流可覆盖的鸡笼区域范围；交互项中$\theta_1 Q$次之，而$\theta_2 Q$影响相对最小。

图11所示为模型中因素θ_1和θ_2的响应曲面，可知当θ_2处于10°～50°的较低水平时，鸡笼区域$\overline{I_{THV}}$随着θ_1的增大而减小；当θ_2处于50°～90°较高水平时，鸡笼区域I_{THV}随着θ_1的增大先减小后增大。

2）热环境优化方案。Ma等[20]指出蛋鸡生活区域的I_{THV}适宜范围的中心值为22.5，越偏离该值蛋鸡越易遭受冷应激、热应激影响。当前θ_1=30°、θ_2=15°、Q=40 000 m³/h对应的鸡笼区域I_{THV}为26.07。在不改变鸡舍其他固有结构的前提下，利用前述拟合表达式(10)寻找θ_1、θ_2、Q的优化值，使I_{THV}更接近适宜范围中心值，求解条件如式(11)所示：

$$\begin{cases} 10 \leqslant \theta_1 \leqslant 90 \\ 10 \leqslant \theta_2 \leqslant 90 \\ 38000 \leqslant Q \leqslant 42000 \\ \min|\overline{I_{THV}} - 21.5| \end{cases} \tag{11}$$

该式得到的优化值为θ_1=66.08°、θ_2=90°、Q=42 000 m³/h，对应的鸡笼区域I_{THV}预测值为25.65。而不均匀的热环境会影响鸡舍的生产效率[21]，为描述18个独立鸡笼热环境的均匀性，可使用鸡笼区域I_{THV}的变异系数CV_{THVI}以量化差异程度，其表达式如式(12)所示：

$$CV_{THVI} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} \frac{(I_{THV} - \overline{I_{THV}})^2}{n}}}{\overline{I_{THV}}} \tag{12}$$

式(12)中，n是独立鸡笼的数量，实际取值18。

当前通风方案下，鸡笼区域CV_{THVI}=1.63%。利用前述方法拟合θ_1、θ_2、Q与CV_{THVI}的函数关系，所得到的拟合表达式为式(13)，拟合模型P=0.007 3<0.005 0，决定系数R^2=0.905 8，证明该表达式对响应值也具有显著拟合效果。

$$\begin{aligned} CV_{THVI} = & -0.683853 + 4.01563 \times 10^{-5}\theta_1 + 1.24531 \times \\ & 10^{-4}\theta_2 + 3.48469 \times 10^{-5}Q + 6.25 \times 10^{-7}\theta_1\theta_2 + \\ & 3.125 \times 10^{-10}\theta_1 Q - 3.125 \times 10^{-9}\theta_2 Q - 7.73438 \times \\ & 10^{-7}{\theta_1}^2 + 3.35937 \times 10^{-7}{\theta_2}^2 - 4.34375 \times 10^{-10}Q^2 \end{aligned} \tag{13}$$

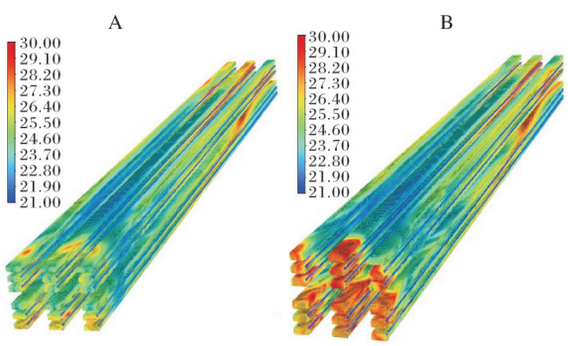
CV_{THVI}越小，表示舍内鸡笼区域整体的热环境越均匀，为减小18个独立鸡笼之间热环境水平差异，减小CV_{THVI}，加设如下的优化条件：

$$\min|CV_{THVI} - 0| \tag{14}$$

使用Design Expert Optimization模块求解同时满足条件(11)和(14)的3因素优化值，结果预测当θ_1=90°、θ_2=10°、Q=42 000 m³/h时，CV_{THVI}为1.25%，I_{THV}为25.66，可有效提升鸡笼区域热环境均匀性与适宜度。

3）热环境优化结果。在ANSYS Fluent Solution中将通风设备状态设置为前述优化方案，即θ_1=90°、θ_2=10°、Q=42 000 m³/h，保持其他条件与前述验证模型一致，结果显示优化后的鸡舍$\overline{I_{THV}}$和CV_{THVI}的模拟值分别为25.65与1.24%，与优化调节预测值的相对误差分别为0.03%和0.6%，再次验证了优化过程和数值模拟方法的可靠性。

图12所示为优化前后舍内鸡笼区域的THVI分布云图。图12A显示，优化前鸡舍的各列鸡笼靠近前山墙位置的I_{THV}值较高，特别前3层鸡笼前端达27.45～27.98。原因主要是优化前鸡舍θ_1为30°锐角，从前山墙进入的新鲜空气会沿该斜向抵达舍内天花板，并反射至后方鸡笼，无法与所述区域的滞留热量进行充分热交换；而风机的负压作用使得两侧进入的新鲜气流亦难以覆盖该区域。因此前端鸡笼温度、相对湿度虽较适宜，但0.13～0.21 m/s的低空气流速导致其热环境并不理想。此外热量和水汽的累积使中后段鸡笼位置I_{THV}达27.75，该位置的温度达27.23 ℃，相对湿度达47.36%。



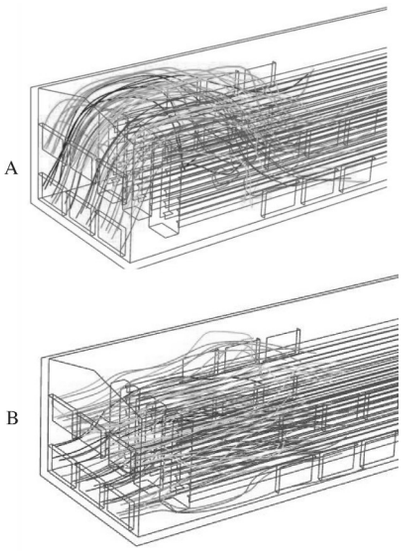
A：优化前的I_{THV}云图 I_{THV} cloud map before optimization；B：优化后的I_{THV}云图I_{THV}cloud map after optimization

图12 鸡笼区域I_{THV}云图

Fig.12 I_{THV} cloud map of chicken cage areas

将θ_1、θ_2、Q调整为90°、10°、42 000 m³/h后，鸡舍前端鸡笼的I_{THV}得以降低至24.61左右。如图12B所示，所有鸡笼区域I_{THV}较优化前下降1.61%，热环境质量整体提升；且CV_{THVI}较优化前下降23.93%，热环境均匀性得以改善，而通风设备能耗增加仅为1.79%。如图13所示为优化前、后的前山墙隧道进气口空气入舍流动迹线，θ_1的显著增加使气流入射方向指向鸡笼前端，相较原始方案能够充分覆盖集蛋设备阻挡位置，增强气流交换作用，减少气流滞留区体积；此外负压风机通风量的增加提升了舍内空气

流速，补偿了由于集蛋装置、鸡笼区域以及清粪装置的流动阻力导致的动量损失。



A：优化前的空气迹线 Air trace before optimization；B：优化后的空气迹线 Air trace after optimization.

图 13　前山墙隧道进气口空气迹线

Fig.13　Air trace at the intake of the front mountain wall tunnel

3　讨　论

本研究以秋季纵向通风模式下的密闭式笼养蛋鸡舍为研究对象，建立了舍内空气流场的CFD数值模型。建模过程中针对鸡舍结构特点进行几何简化，将鸡笼区域和金属格栅地板定义为具有阻力系数的多孔介质区域并估算了笼内蛋鸡的产热和产湿速率。根据试验测量值赋予模型边界条件并进行迭代求解。对数值模型进行验证后分析了舍内气流场的热环境特点，并利用正交仿真试验优化通风设备参数，分析对比优化前、后的鸡笼区域的$\overline{I_{THV}}$和CV_{THVI}，结果表明：(1)选取舍内24个验证点验证所建立CFD数值模型的准确度，其中温度场、相对湿度场、空气流速场的平均相对误差分别为0.38%、0.52%、4.62%，表明所建立模型和试验鸡舍实际情况的吻合度较好；分析当前通风方案热环境，发现存在优化空间。(2)选取前山墙隧道进气口导流板夹角、侧墙隧道进气口夹角、末端单个负压风机的通风量为试验因素；选取鸡笼区域的$\overline{I_{THV}}$为响应值进行17组正交仿真试验，得到响应模型并设定优化过程得到优化解θ_1=90°、θ_2=10°、Q=42 000 m³/h；对应的$\overline{I_{THV}}$和CV_{THVI}预测值分别为25.66和1.25%。(3)基于优化解进行CFD数值模拟，得到鸡笼区域的$\overline{I_{THV}}$和CV_{THVI}分别为25.65、1.24%，与预测值之间相对误差分别为0.03%和0.6%，再次验证了本研究模拟方法的有效性。优化通风方案下$\overline{I_{THV}}$和CV_{THVI}相较于原通风方案分别下降1.61%和23.93%，有效改善了蛋鸡舍内空气流场热环境的适宜度和均衡性。现有部分关于鸡舍热环境优化的研究将优化因素选为不可调的固有结构，本研究考虑到实际应用场景限制，将优化因素选取可调节的通风设备。此外，现有相关研究的优化解多从直接设定的多方案中对比获取，而本研究采取的效应面法能更有效选取最优方案。但本研究未考虑极端天气工况，后续可通过扩展参数范围完善模型普适性，为笼养蛋鸡舍的通风模拟和优化提供一定的方法参考。

参考文献 References

[1] 郑树利，徐友祎，郭玲.高密度笼养蛋鸡舍最小通风温度场分析[J].中国家禽，2018，40(20)：42-46. ZHENG S L，XU Y Y，GUO L.The minimum ventilation temperature field in high-density caged laying house[J].China poultry，2018，40(20)：42-46 (in Chinese with English abstract).

[2] BUSTAMANTE E，CALVET S，ESTELLÉS F，et al.Measurement and numerical simulation of single-sided mechanical ventilation in broiler houses[J].Biosystems engineering，2017，160：55-68.

[3] 王阳，郑炜超，李绚阳，等.西北地区纵墙湿帘山墙排风系统改善夏季蛋鸡舍内热环境[J].农业工程学报，2018，34(21)：202-207. WANG Y，ZHENG W C，LI X Y，et al. Vertical walls-evaporative cooling pad and gable-exhaust-air-ventilation system improving poultry house thermal environment in Northwest region of China [J]. Transactions of the CSAE，2018，34(21)：202-207 (in Chinese with English abstract).

[4] 纪文康，施志钢，张璐瑶，等.大型叠层笼养肉鸡舍气流组织模拟与优化[J].青岛理工大学学报，2024，45(2)：147-154. JI W K，SHI Z G，ZHANG L Y，et al. Simulation and optimization of the air distribution of largest acked cage broiler coop [J]. Journal of Qingdao University of Technology，2024，45(02)：147-154(in Chinese with English abstract).

[5] 程琼仪，穆钰，李保明.进风位置对纵向通风叠层鸡舍气流和温度影响CFD模拟[J].农业工程学报，2019，35(15)：192-199. CHENG Q Y，MU Y，LI B M.CFD simulation of influence of air supply location on airflow and temperature in stacked-cage hen house with tunnel ventilation [J]. Transactions of the CSAE，2019，35(15)：192-199 (in Chinese with

English abstract).

[6] 江晓明,张衍林,张兴广,等.基于CFD的密闭式半阶梯笼养蛋种鸡舍过渡性通风研究[J].华中农业大学学报,2017,36(6):113-120. JIANG X M,ZHANG Y L,ZHANG X G,et al.CFD-based studies on transitional ventilation of closed henhouse with semi ladder coop[J].Journal of Huazhong Agricultural University,2017,36(6):113-120 (in Chinese with English abstract).

[7] 董耀宗,潘云霞,关正军.阶梯笼雏鸡舍热水散热风机进风角度CFD模拟与效果测试分析[J].东北农业大学学报,2022,53(2):73-81. DONG Y Z,PAN Y X,GUAN Z J.CFD simulation and effect test analysis of air inlet angle of heating fan in stepped cage brooding chicken house[J].Journal of Northeast Agricultural University,2022,53(2):73-81 (in Chinese with English abstract).

[8] TONG X J,HONG S W,ZHAO L Y.CFD modelling of airflow pattern and thermal environment in a commercial manure-belt layer house with tunnel ventilation[J].Biosystems engineering,2019,178:275-293.

[9] NIELSEN P V,ALLARD F,AWBI H B,et al.Computational fluid dynamics in ventilation design REHVA guidebook No_{10}[J].International journal of ventilation,2007,6(3):291-294.

[10] NORTON T,GRANT J,FALLON R,et al.Improving the representation of thermal boundary conditions of livestock during CFD modelling of the indoor environment[J].Computers and electronics in agriculture,2010,73(1):17-36.

[11] 王树才,姚祝.基于CFD的蛋鸭舍内环境模拟分析与验证[J].安徽农业大学学报,2020,47(3):462-471. WANG S C,YAO Z.Simulation of airflow field and temperature field of laying duck house based on CFD[J].Journal of Anhui Agricultural University,2020,47(3):462-471 (in Chinese with English abstract).

[12] BJERG B,SVIDT K,ZHANG G,et al.Modeling of air inlets in CFD prediction of airflow in ventilated animal houses[J].Computers and electronics in agriculture,2002,34(1/2/3):223-235.

[13] SEO I H,LEE I B,MOON O K,et al.Modelling of internal environmental conditions in a full-scale commercial pig house containing animals[J].Biosystems engineering,2012,111(1):91-106.

[14] CHENG Q Y,FENG H B,MENG H B,et al.CFD study of the effect of inlet position and flap on the airflow and temperature in a laying hen house in summer[J].Biosystems engineering,2021,203:109-123.

[15] PEDERSENS , SLLVIK K. Climatization of animal houses-heat and moisture production at animal and house level[M]. Copenhagen:Danish Institute of Agricultural Sciences, 2002.

[16] HU C Z,LI L H,JIA Y C,et al.CFD investigation on combined ventilation system for multilayer-caged-laying hen houses [J/OL]. Animals, 2024, 14 (17) : 2623 [2025-01-07]. https://doi.org/10.3390/ani14172623.

[17] 曾志雄,魏鑫钰,吕恩利,等.集中通风式分娩母猪舍温湿度数值模拟与试验验证[J].农业工程学报,2020,36(3):210-217. ZENG Z X,WEI X Y,LÜ E L,et al.Numerical simulation and experimental verification of temperature and humidity in centralized ventilated delivery pigsty[J].Transactions of the CSAE,2020,36(3):210-217 (in Chinese with English abstract).

[18] 吴捷刚.基于CFD的秋季蛋鸡舍环境评估与优化研究[D].杭州:浙江大学,2021.WU J G.Assessment and optimization on the environment of laying hen house in autumn based on CFD[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021(in Chinese with English abstract).

[19] TAO X,XIN H.Acute synergistic effects of air temperature, humidity, and velocity on homeostasis of market size broilers [J].Transactions of the CSAE,2003,46(2):491-497.

[20] MA H Y,TU Y N,YANG X T,et al.Influence of tunnel ventilation on the indoor thermal environment of a poultry building in winter[J/OL].Building and environment,2022,223:109448 [2025-01-07]. https://doi. org/10.1016/j. build-env.2022.109448.

[21] 张斌龙.基于CFD的蛋种鸡舍热环境模拟研究与通风优化设计[D].武汉:武汉轻工大学.2023. ZHANG B L.Thermal environment simulation and ventilation optimization design of egg-laying henhouse based on CFD [D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2023 (in Chinese with English abstract).

Numerical simulation and optimization of thermal environment in a closed cage-rearing layer house in autumn

ZHOU Jianwei[1], WEI Zebin[2], WANG Shucai[1], GONG Dongjun[1,3]

1.*College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China*;
2.*College of Animal Science and Technology and College of Veterinary Medicine, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China*;
3.*Wuhan Vocational College of Software and Engineering (Wuhan Open University), Wuhan 430205, China*

Abstract　The distribution of the temperature field, relative humidity field, and airflow velocity field in the current layer house was simulated with computational fluid dynamics (CFD) to optimize the thermal environment in a closed cage-rearing layer house under the mode of vertical ventilation in autumn. The accuracy of the numerical model was verified. The average THVI (temperature-humidity-velocity index) and coefficient of variation (CV_{THVI}) of the cage-rearing areas were calculated for the parameters of ventilation equipment including the angle of the guide plate at the front mountain wall tunnel inlet (θ_1), the angle of the guide plate at the side wall tunnel inlet (θ_2) and ventilation volume of a suction fan at the end (Q) at three different levels by conducting 17 sets of orthogonal simulation experiments. The results showed that the average relative error of temperature, relative humidity, and airflow velocity at the 24 verification points set on the aisle of cage was 0.38%, 0.52%, and 4.62%, respectively, indicating that the accuracy of the numerical model is high. When the parameters of ventilation equipment θ_1, θ_2 and Q were set to 10°, 90° and 42 000 m^3/h, the average THVI and coefficient of variation CV_{THVI} of the airflow field in the cage-rearing areas was 25.65 and 1.64%, 1.61% and 23.93% lower than that of the original scheme of ventilation, beneficial for improving the suitability and balance of the thermal environment in the cage-rearing areas of the layer house.

Keywords　closed cage rearing layer house; numerical simulation; hot environment; temperature; relative humidity; airflow velocity

（责任编辑：张志钰）