

侧墙小窗进风条件下纵向通风鸡舍流场均匀性优化方法

彭海青^{1,2,3,4}, 李福伟^{1,2,3}, 李大鹏^{1,2,3}, 王 阳^{4,5,6},
李 浩^{4,5,6}, 郑炜超^{4,5,6}, 李保明^{4,5,6*}

(1. 山东省农业科学院家禽研究所, 济南 250100; 2. 山东省主要畜禽育种重点实验室, 济南 250100; 3. 济南市家禽种质创新与健康养殖重点实验室, 济南 250100; 4. 中国农业大学水利与智能工程学院, 北京 100083; 5. 农业农村部设施农业工程重点实验室, 北京 100083; 6. 北京市畜禽健康养殖环境工程技术研究中心, 北京 100083)

摘 要: 针对侧墙小窗进风纵向通风系统 (holistic sidewall ventilation system, HSVS) 规模化鸡舍存在的舍内前端截面风速低、回流区位置不合理等问题, 该研究在规模化 HSVS 鸡舍进行试验, 通过梯度调整舍前区进风口开启角度, 多点实测不同工况下的舍内外压差、笼内风速变化, 结合计算流体动力学 (computational fluid dynamics, CFD) 模拟方法, 系统分析 HSVS 鸡舍流场优化效果。结果表明, 鸡舍压差随前区进风口开启角度增加而降低, 且仍分布均匀, 所有工况下鸡舍中部平均压差较前端高 (1.7 ± 0.2) Pa。前区进风口开启角度增加至 90°时, 鸡舍中部风速最大, 且风速与压差变化呈反比关系, 舍内风速不均匀系数可降至 0.30 以下; 通过 CFD 模拟可知, 增加前区进风口角度可使舍内整体风速提升, 鸡舍前端截面风速平均升高 0.10 m/s, 且可改善鸡舍中部风速, 降低不均匀系数。该研究结果表明, 增加前区进风口开启角度至 70°及以上可有效改善鸡舍前端气流环境, 提升舍内气流均匀性, 为纵向通风等鸡舍环境控制策略提供参考。

关键词: 鸡舍; 通风系统; 进风口; 流场; 数值模拟; 气流优化

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202601257

中图分类号: S126

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2026)-12-0031-10

彭海青, 李福伟, 李大鹏, 等. 侧墙小窗进风条件下纵向通风鸡舍流场均匀性优化方法[J]. 农业工程学报, 2026, 42(12): 31-40. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202601257 <http://www.tcsae.org>

PENG Haiqing, LI Fuwei, LI Dapeng, et al. Optimizing flow field uniformity in poultry houses with a holistic sidewall ventilation system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2026, 42(12): 31-40. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202601257 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

舒适均匀的饲养环境, 既是有效控制鸡群呼吸道疾病的关键, 也是鸡只遗传潜力得以充分发挥的重要保障^[1]。规模化鸡舍常采用传统纵向通风模式实现控温降温, 但仍存在舍内温度分布不均、温度波动性大等问题。近年来, 侧墙小窗进风纵向通风系统 (holistic sidewall ventilation system, HSVS) 因其能够有效优化夏季蛋鸡舍内热环境的空间均匀性, 在水平和垂直方向上减小温差, 为舍内提供了更均匀的温度分布^[2-4], 受到了广泛关注。然而进一步研究发现, HSVS 鸡舍中存在流场分布不均问题, 无风机端鸡只位置风冷效应弱, 舒适度较风机端偏低^[5]。

为解决气流经进风口进入鸡舍后分布不均匀问题, 国内外学者已展开了许多研究。WEBSTER 等^[6]通过现场实测夏季鸡舍内温度及风速, 发现通过增加运行风机

量可以提高笼区风速, 然而气流主要流经走道和鸡笼顶部空间, 对鸡只活动区域风速的提升效果十分有限。此外, 仅增加运行风机量会提高压差, 反而降低风机性能。因此, 通过开启多台风机提升鸡只活动区域风速以促进对流散热, 仍具有较大挑战^[7]。

纵向通风鸡舍在送风量一定的情况下, 舍内气流分布在很大程度上取决于进风射流^[5]。通过射流特性可以估计和控制射流进入动物区的位置, ZHANG 等^[8]发现, 射流下落距离由进风口阿基米德数 (Ar)、进风口开度及结构共同决定。在此基础上, 学者们系统探讨了不同进风参数对通风效果的影响。CHOI 等^[9]揭示了不同进风口面积下的舍内风速和压差的变化规律。PARK 等^[10]进一步量化了侧墙进风口开口角度和压差对进风口风速的作用。在参数优化方面, 房俊龙等^[11]研究认为进风角度为 60°时, 在气流均匀性、最大风速即空气新鲜程度等方面综合较优。KWON 等^[12]根据鸡舍通风率、进风口开启角度和室外气温等变量, 基于 CFD 模拟提出了射流下落距离模型, 以管理控制进风冷射流。由于在畜禽舍内进行长时间环境实测难度较大, 前人研究中实测数据多基于缩尺模型或实验室工况, 且多聚焦于进风口特性对风机性能的影响^[9,13-14], 目前尚不能明确如何通过调控进风口开启角度以优化舍内流场。

传统纵向通风系统中, 侧墙小窗多由环控器同步控制, 这为基于射流特性的气流组织优化提供了基础。

收稿日期: 2026-01-29 修订日期: 2026-05-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (32272925); 山东省自然科学基金项目 (ZR2023QC120); 山东省农业科学院农业科技创新工程项目 (CXGC2025F21-2-2); 国家现代农业产业技术体系 (蛋鸡) 专项 (CARS-40)
作者简介: 彭海青, 博士, 助理研究员, 研究方向为家禽精准养殖技术与智能装备。Email: saasphq@163.com

※通信作者: 李保明, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为环境畜禽设施养殖工艺与环境控制。Email: libm@cau.edu.cn

PENG 等^[5]研究发现,将侧墙小窗等分为前、中、后三区并独立调控时,进风口特性的变化会显著影响舍内流场。然而,如何通过调整分区进风口参数来优化该模式下的气流组织,仍需深入研究,明确该调控机制对于该通风策略在全国全季节蛋鸡舍环控的推广应用具有重要意义。

因此,本研究以分区调控的侧墙小窗进风纵向通风鸡舍作为研究对象,在不同通风量下,通过实测不同前区进风口开启策略对舍内气流组织影响,以确立最优调控参数,进而结合 CFD 模拟进一步挖掘进风口分区调控在优化 HSVS 鸡舍通风中气流组织的作用效果,以期为全国全季节全侧墙进风山墙排风鸡舍气流优化提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验鸡舍

试验鸡舍采用农业农村部设施农业工程综合重点实验室开发的立体栖架散养系统,位于北京市平谷区南独乐河镇南独乐河村(117°23'N, 40°19'E),西南-东北朝向。福利化立体散养鸡舍长 79 m,跨度 14 m,脊高 6.8 m,檐高 4.8 m,存栏京粉 6 号蛋鸡 13 000 只。与传统纵向通风模式进风口位置不同,HSV S 鸡舍的进风口分别安装在两侧墙上^[3],如图 1 所示。HSV S 鸡舍配备有四块湿帘,安装在两侧外墙上,每块湿帘尺寸为长 22 m × 高 1.5 m × 厚 0.15 m。舍内共配有 36 组立体栖架笼,三列四走道,走道 1.4 m。舍内共 12 组笼具。单组笼具尺寸长 6 m × 宽 2.8 m,栖杆总长度为 72 m (6 × 12 m)。立体栖架散养系统每层鸡笼都配有料槽和乳头饮水器,可配备用于鸡只疫苗管理的旋转网门,且每层设有粪带,每日一清。立体栖架散养系统是传统笼养系统的替代方案之一,可为鸡只提供多层活动空间,鸡只可以在各层之间移动或在上栖架休息。

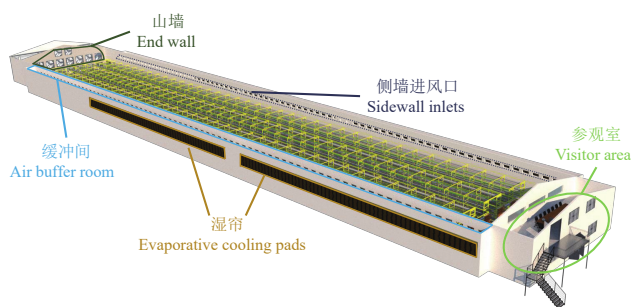


图 1 试验鸡舍示意图
Fig.1 Schematic of test poultry house

1.2 进排风口配置

为满足不同分区鸡只的通风需求,两侧墙上共配有 118 个侧墙进风口,单个尺寸为长 0.77 m × 宽 0.34 m,面积为 0.26 m²。舍外空气气流先经湿帘进入缓冲间,然后经侧墙进风口进入舍内,进风口的开启角度 (θ) 由环境控制器统一控制。进风口开启角度范围为 0~90°。118 个侧墙进风口被分为前、中、后三个可控区域,进风口数量分别为前部 40 个、中部 40 个和后部 38 个 (图 2),且每个区域的进风口开启角度可以单独控制。

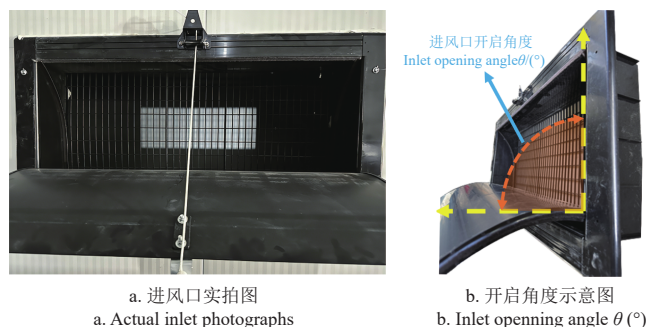


图 2 进风口实拍与开启角度示意图
Fig.2 Actual photographs and schematic of the inlet opening angle

舍内空气理想风速为 1.5~3.0 m/s^[15],结合进风面积及通风需求,鸡舍共配备风机 14 台。其中定频风机 12 台,功率 1 800 W,额定风量 47 800 m³/h;变频风机 2 台,功率 750 W,额定风量 23 300 m³/h。舍内风机开启数量由舍内温度与目标温度差值决定,设定共 10 个通风等级。纵向通风鸡舍内外压差一般建议保持在 10~30 Pa,可满足大部分通风换气需求^[16]。因此对应 1~10 共 10 个通风等级,进风口开启角度依次为 10°、15°、20°、30°、36°、42°、50°、60°、80°、90°。试验过程中,测试期间舍外温度平均为 (-1.4±3.7) °C,相对湿度为 37.3%±12.7%,舍外平均风速为 (0.8±0.8) m/s,舍内平均温度为 (2.8±1.3) °C,相对湿度为 53.1%±16.8%。前期研究表明,当运行 3 台或 4 台风机时,在不同进风口开启角度下舍内外压差均均低于 70 Pa,具备安全测试的前提;而运行 1 台或 2 台风机属于最小通风级别,气流难以形成贴附射流^[5]。为避免寒冷空气及高压对鸡只及设施设备(水线、水管等)造成影响,试验特选在空舍期进行,并只针对运行 3 台或 4 台风机的工况开展测试。风机数量及位置以图 3 为准。



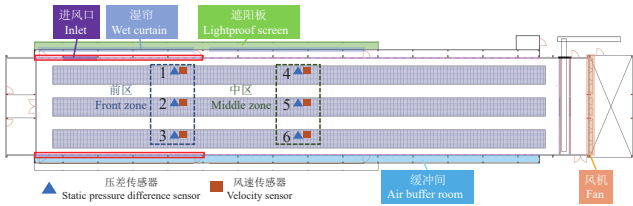
注:圆框内数字为风机编号。同步启用编号①、②、③风机时,对应通风等级 3;启用编号①、②、③、④风机时,对应通风等级 4;其余通风等级遵循此对应规则。
Note: The numbers inside the circular frames are fan serial numbers. When fans No. ①, ② and ③ are activated synchronously; when fans No. ①, ②, ③ and ④ are activated synchronously; This correspondence rule shall be followed for all other ventilation levels.

图 3 通风等级及风机位置
Fig.3 Ventilation level and fan position

1.3 环境实测方法

测试时间为 2025 年 1 月 2 日至 2025 年 1 月 15 日,测试仪器主要包括精确度为 ±0.02 m/s 的风速传感器

(EE650, E+E Elektronik, 0~10 m/s, 奥地利), 压差采用精确度为 ± 1 Pa 的压差传感器 (LFM108, LEFOO, 中国杭州, 0~100 Pa)。6 个风速、压差传感器分布在舍内 (前中区)。压差传感器负压管置于笼内, 正压管置于舍外, 两气管处于同一高度, 如图 4 中数字 1 至 6 所示。已有多位学者研究发现 HSVS 鸡舍后端与中部在进风口开启角度相同时热环境类似^[3,5,17], 因此, 本研究未在舍后端设置测点。舍内风速、压差测点沿鸡舍纵向分别距离无风机山墙 11、32 m, 且都固定安装在距离地面的高度为 1.5 m 的鸡只活动区域内。每个测量点以 5 s 的间隔连续记录数据, 所有传感器的监测同步进行。



注：鸡舍两侧侧墙进风口沿鸡舍长轴对称布置。无风机端两侧墙前部区域为进风口前区，共 40 个进风口。数字 1~6 代表测试点位。
Note: Inlets on the two side walls of the poultry house are symmetrically arranged along the long axis of the house. The front section of both side walls at the fan-free end forms the front inlet zone, which is equipped with 40 inlets in total. Numbers 1 to 6 represent the test positions.

图 4 环境传感器测点
Fig.4 Location of the environmental sensors

试验聚焦于 HSVS 鸡舍前区进风口开启角度的调控效果。前区进风口开启角度以 10° 为梯度, 从 $10^\circ \sim 90^\circ$ 共设 9 个测试水平; 中后部进风口开启角度则固定为各通风等级对应的初始设定值, 即通风等级为 3 时, $\theta=20^\circ$; 通风等级为 4, $\theta=30^\circ$ 。这一试验设定旨在系统评估前区进风角度对舍内流场的影响。

1.4 CFD 模型构建及数值计算方法

1.4.1 基于 CFD 的鸡舍模型构建

数值模型气流遵循质量和动量守恒方程 (纳维-斯托克斯方程)。在稳态情况下, 计算见式 (1)、(2)。

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \cdot (\rho u_i \vec{u}) = -\nabla P + \nabla \cdot (\mu \nabla u_i) \quad (2)$$

式中 ρ 为空气密度, kg/m^3 ; $\vec{u}$ 是混合物速度, m/s ; u_i 是 $\vec{u}$ 的第 i^{th} 个分量; P 是空气压力, Pa 。

在稳态雷诺平均纳维-斯托克斯 (reynolds-averaged navier-stokes, RANS) 建模中, 瞬时量被分解为时间平均量和波动量。不可压缩牛顿流体的 RANS 方程如下:

$$\frac{\partial \rho \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

$$\bar{u}_j \frac{\partial \rho \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \overline{u'_j \frac{\partial u'_i}{\partial x_j}} \quad (4)$$

式中 $\bar{u}_j$ 和 $\bar{u}'_i$ 分别是速度分量 u_i 在 x_i 方向的平均项和波动项; $\bar{p}$ 是平均压力, Pa ; μ 是粘度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。

本研究以 HSVS 鸡舍为对象构建几何计算模型, 所有模拟工况仅通过调节鸡舍前区 40 个通风小窗的开启角度进行设置。计算流体力学模拟采用 Fluent (ver. 21.0.,

ANSYS 公司, 美国) 进行, 湍流模拟方程使用雷诺平均 NS 方程 (RANS)。求解方法采用稳态计算求解器, 求解器设置为压力-速度耦合求解。模拟采用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型, 大量研究表明在许多与畜牧业建筑内部气流相关的类似研究中, RNG $k-\varepsilon$ 模型被认为是一种可靠的计算湍流模型^[18]。对流的速度和湍流项均采用二阶上风离散法, 以提高最终求解的精度, 采用 Coupled 方法进行压力-速度耦合。

1.4.2 计算域和边界条件

进风口边界设定为大气压的压力入口, 排风速度通过李宗刚^[19] 的测试方法实测获得, 通风等级 3、4 的排风速度分别为 5.03、4.47 m/s。墙壁、屋顶和地面均被定义为无滑移壁面。

1.4.3 网格划分和网格独立性检验

鸡舍模型验证的计算域网格划分直接影响计算时长与计算精度, 使用 ICEM 19.0 (ver17.0, ANSYS Inc., Pennsylvania, 美国) 和 ANSYS Meshing 2021R1 对已建立的模型进行网格划分。鸡舍山墙及侧墙区域划分为非结构网格, 侧墙进风口等复杂计算域生成六面体结构网格, 舍内流体域生成四面体非结构网格, 结构网格与非结构网格以交界面连接。网格划分形成后采用提升网格质量工具对生成网格的网格质量进行优化, 网格质量平均在 0.7 以上, 最小正交质量保持在 0.3 以上。模型图及网格分布如图 5 所示。

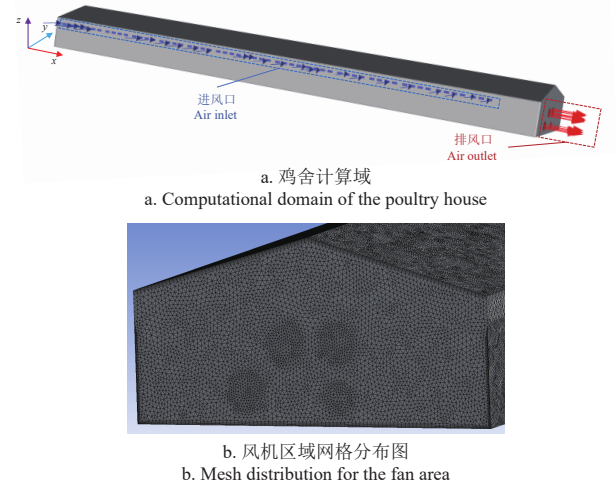


图 5 鸡舍计算域及部分网格分布
Fig.5 Computational domain and partial mesh distribution of the poultry house

为了保证求解网格精度的同时减少计算机运行时间及成本, 本研究选择进风口开启角度为 40° 时的工况, 使用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型进行网格独立性检验。低质量网格可能导致模拟结果不准确甚至无法收敛; 但网格数量过多时, 会导致计算复杂度增加而过多浪费资源等问题, 网格数量的过度增加并不必然提升数值模拟的计算精度。因此, 取 3 组细、中、粗不同网格大小的网格工况, 平均网格大小分别为 0.10、0.15、0.20 m, 对进出口区域进行加密处理, 网格数量及相邻网格层级的相对误差见表 1。网格尺寸 0.15 m 的工况 2 相对误差满足精度要求且计算

效率最优, 最终选择工况 2 完成后续仿真。

表 1 网格独立性测试表
Table 1 Grid independence test sheet

工况 Case	网格尺寸 Mesh size/m	网格数 Number of mesh	相邻工况间相对误差 Relative error between adjacent case/%
工况 1	0.10	23 529 654	0
工况 2	0.15	10 531 220	5.6
工况 3	0.20	5 161 257	8.1

1.5 评估指数

规模化家禽舍内气流分布的均匀性, 常采用不均匀性系数 (I_x) 评价^[20]。不均匀系数定义为舍内风速的标准差与平均值的比值, 计算见式 (5) ~ (7)。

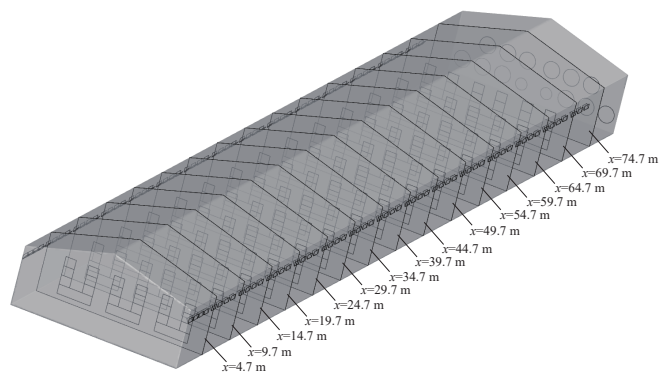
$$I_x = \frac{\sigma_i}{\bar{x}} \quad (5)$$

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n} \quad (6)$$

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (7)$$

式中 n 为样本数量, x_i 为第 i 个测点速度值, m/s; $\bar{x}$ 为风速平均值, m/s; σ_i 为环境参数的标准差。

不均匀性系数可反映气流参数相对于均值的离散波动程度。参考已有研究标准^[21], 不均匀系数小于 0.5 时, 表明环境参数分布均匀, 且 I_x 越小气流分布更为均匀。沿鸡舍长度方向, 从 $x=4.7$ m (笼具一端) 至 $x=74.7$ m (风机端) 每隔 5 m 设置一个鸡舍截面, 计算各横截面的面加权平均速度, 结果如图 6 所示。笼内风速的不均匀性系数, 基于 15 个平行于山墙的截面风速数据计算出。



注: x 代表距无风机端山墙的距离。

Note: x represents the distance from the end wall without the fan.

图 6 鸡舍横截面示意图

Fig.6 Cross-sectional schematic diagram of poultry house

1.6 测试模拟数据分析

不同时间、位置的风速及压差数据通过塔石物联网平台 (TASTEK WL-CLOUD) 提取。压差管由于意外情况挤压, 在测试过程中可能出现极大误差数据, 此数据通过人工筛选剔除。所有数据结果以平均值±标准差表示。不同模型下 CFD 模拟后处理通过 CFD-POST 进行。剖面风速数据由 CFD-POST 计算速度幅值 (velocity magnitude) 并统计不同剖面风速平均值。试验数据使用 Excel 2021 整理, 并使用 IBM SPSS Statistics 25.0 (Armonk, 美国) 进行分析。图表使用 Origin 2019

(Origin Lab, Northampton, MA, 美国) 绘图软件绘制。

2 结果与分析

2.1 前区进风口开启角度对舍内气流场影响

2.1.1 笼内处与舍外压差变化

图 7 对比了运行 3 台风机与运行 4 台风机时前区不同进风口开启角度对舍内外压差的影响。

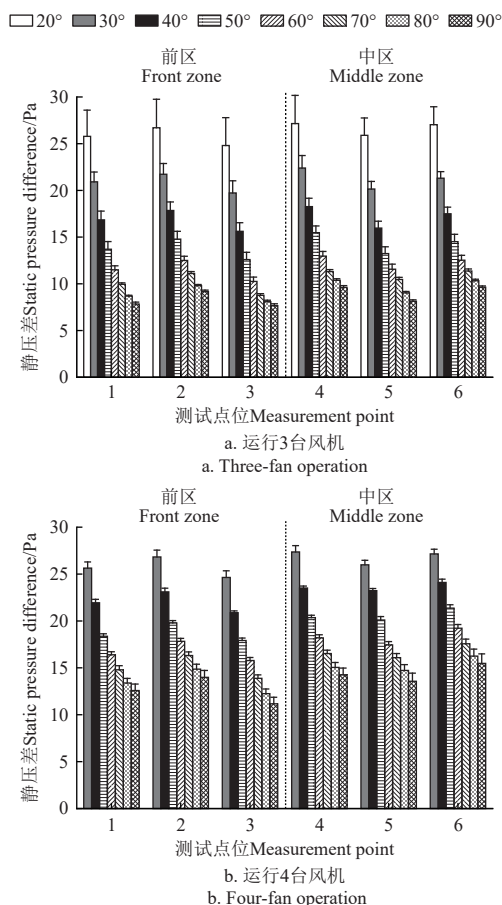


图 7 前区进风口开启角度对静压差的影响

Fig.7 Effects of θ of front inlets on static pressure difference

结果显示, 压差随前区进风口角度增加而下降。在运行 3 台和 4 台风机两种工况下, 鸡舍前中部的最大压差均出现在进风口开启角度为 20° 时。运行 3 台风机时, 鸡舍前端最大平均压差为 (25.5 ± 0.5) Pa, 鸡舍中部最大平均压差为 (27.0 ± 0.2) Pa; 运行 4 台风机时, 鸡舍前端最大平均压差为 (25.4 ± 0.6) Pa, 鸡舍中部最大平均压差为 (27.4 ± 1.1) Pa。运行风机 3 台时, 前区进风口开启角度为 20°~90° 的所有测试工况中, 鸡舍前端测点 2 平均压差最大, 为 (11.8 ± 4.2) Pa, 舍中部测点 5 平均压差最大, 为 (14.4 ± 4.3) Pa, 同理, 运行风机 4 台中测点 2 与测点 5 压差分别为 (16.7 ± 4.5) 、 (19.3 ± 4.5) Pa。结果发现, 受风机端负压影响, 舍内前、中区间存在稳定的压差梯度, 其中舍中部的平均压差高于舍前端。所有工况下 (进风口开启角度为 20~90°), 鸡舍前中部的压差平均差值为 (1.7 ± 0.2) Pa, 且该差值不随进风口开启角度及通风等级的变化而改变。这与管道均流原理类似, 由于管道内的流体在流动过程中受到阻力和摩擦的影响, 从而导致靠近抽风机侧的孔洞流速较高, 远离抽风机侧

的孔洞流速较低^[22]。结果说明前区进风口开启角度增加可降低鸡舍压差，且舍内前中后压差仍分布均匀。

2.1.2 笼内风速变化

图 8 对比了运行 3 台风机与运行 4 台风机时，前区进风口不同开启角度对笼内风速的影响。结果显示，两通风等级总体呈现相同的变化趋势，随前区进风口角度增加而波动上升。运行 3 台风机与运行 4 台风机时，前区进风口开启角度为 20°~90°的所有测试工况中，鸡舍前端测点 2 的平均风速均为最小，分别为 (0.12±0.04)、(0.17±0.05) m/s；而中部测点 5 的风速最大，分别为 (0.25±0.07)、(0.37±0.05) m/s。这一分布特征可能是由于前端进风射流处于始段，尚未扩散即被风机负压牵引至舍后，导致前端风速偏低；而气流在中部能够有效沉降并充分发展，从而在测点 5 处形成风速峰值。当运行 3 台风机且进风口开启角度从 20°提升至 90°时，鸡舍前端平均风速介于 (0.03±0.02) m/s 与 (0.18±0.02) m/s 之间；中部平均风速则在 (0.14±0.08) m/s 至 (0.30±0.06) m/s 范围内。当运行 4 台风机且进风口开启角度从 30°提升至 90°时，鸡舍前端平均风速由 (0.04±0.03) m/s 增至 (0.25±0.04) m/s，中部平均风速由 (0.27±0.03) m/s 升至 (0.38±0.06) m/s；舍内整体平均风速增加 (0.16±0.06) m/s。增加进风口开启角度可明显提升舍前、中区笼内风速，这主要是由于前区进风面积增大，进风量增加，更多气流进入笼区。

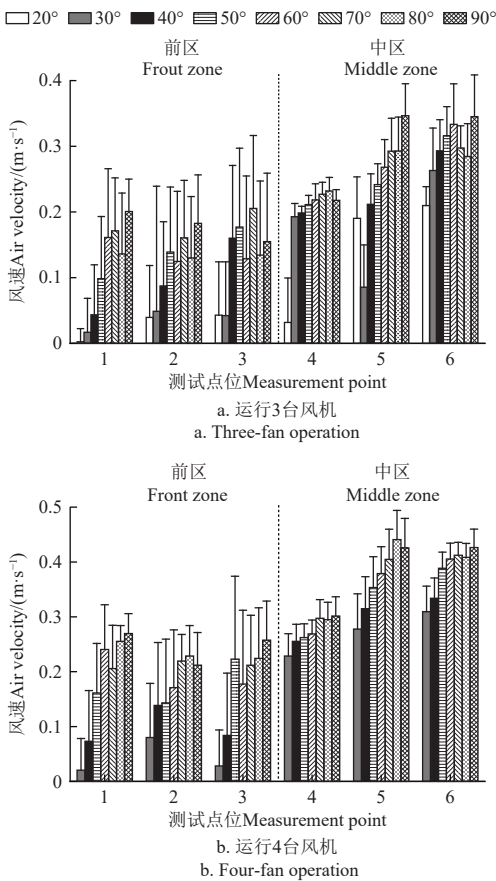


图 8 前区进风口开启角度对笼内风速的影响
Fig.8 Effects of θ of front inlets on the air velocity in the caged-hen occupied zone

郭中旭^[23]在研究中也发现增加进风口开启角度可提升笼内及走道风速。压差对舍内风速有一定影响，当通风量一定时，通过增加进风口开启角度使压差降低，可提升笼内风速。结果可看出，增加前区进风角度可有效改善舍前部通风弱区问题，同时对舍中部风速具有一定的提升作用。

表 2 显示了前区不同进风口开启角度对舍内风速不均匀系数 (I_x) 的影响，结果可知前区进风口开启角度不断增加，不均匀系数不断降低。当运行 3 台风机，且进风口开启角度由 20°升至 90°时，笼内风速不均匀系数由 0.95 降低至 0.32。但进风口开启角度为 70°时不均匀系数最低，这是因为在该角度下，进风射流、天花板与舍内设施相互作用，在两侧形成了尺度较大的回流区，促进了气流流动，气流分布更趋均匀；当开启角度继续增大，一侧射流贴附能力下降，不利于气流组织的整体优化。当运行 4 台风机，进风口开启角度由 30°升至 90°时，笼内风速不均匀系数由 0.75 降低至 0.26。这一变化趋势与开启 3 台风机时一致，随开启角度增加，舍前端笼内风速提升，舍内气流组织得到有效优化。

表 2 前区进风口不同开启角度的笼区风速不均匀系数 (I_x)

Table 2 Air velocity nonuniformity coefficient (I_x) of air velocity in the caged-hen occupied zone under different front inlet θ

风机运行数 Operational fans	不均匀系数 Nonuniformity coefficient							
	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
3 台	0.95	0.82	0.50	0.36	0.37	0.24	0.35	0.32
4 台	/	0.75	0.53	0.36	0.33	0.30	0.28	0.26

注：本研究中“/”代表该工况未进行测试。
Note: "/" indicates that this operating condition was not tested in this study.

2.2 舍内气流场 CFD 模拟结果

2.2.1 HSVS 鸡舍 CFD 模型验证

基于实测研究，确定了 HSVS 鸡舍气流均匀性最优的两种工况：运行 3 台风机时，前区进风口开启角度 70°、中后区 20°，均匀系数为 0.24；运行 4 台风机时，前区进风口开启角度 90°、中后区 30°，均匀系数为 0.26。本研究将全区进风口角度为 20°（3 台风机）、30°（4 台风机）设为对照组，上述最优进风角度工况设为优化组，具体进风口角度设定如表 3 所示。

表 3 鸡舍几何模型进风口角度设定

Table 3 Inlet opening angle setting for geometric model of poultry house (°)

风机运行数 Operational fans	前区开启角度 Opening angle of the front inlet		中区开启角度 Opening angle of the middle inlet		后区开启角度 Opening angle of the rear inlet	
	对照组 Control group	优化组 Optimized group	对照组 Control group	优化组 Optimized group	对照组 Control group	优化组 Optimized group
3 台	20	70	20	20	20	20
4 台	30	90	30	30	30	30

将风速传感器空间位置（图 4）转化为 X、Y、Z 三维坐标并将其输入到 Fluent 内，通过 CFD-POST 进行数据处理，提取速度幅值（velocity magnitude）数据，即可获得模拟计算得到的风速值。为检验数值模型的可靠性，将风速实测值与 CFD 模拟值进行了比较，结果如图 9 所示。

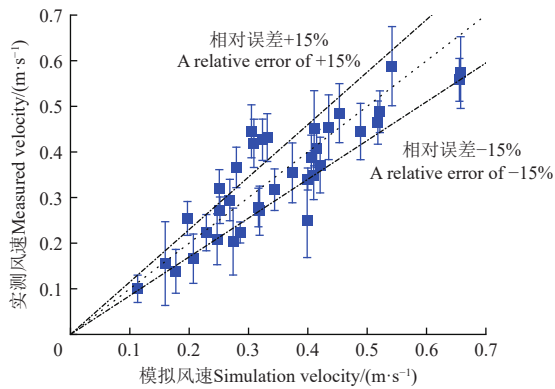


图9 模拟结果与实测结果对比

Fig.9 Comparison of simulation results and measured results

在实地测量过程中,虽然通风量维持恒定,但受外部环境扰动、湍流及浮力效应等因素影响,实测风速仍存在一定波动。为量化模拟结果与实测数据之间的偏差,本研究采用相对误差作为评价指标,其定义为模拟风速与实测风速的差值除以实测风速所得的百分比。对比结果显示(图9),模拟风速与实测风速总体吻合良好,平均相对预测误差约为13%。参考已有研究标准^[20],风速相对误差在15%以内则视为预测值准确度良好。上述结果验证了CFD模型模拟禽舍内气流分布的可行性,同时表明RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型在本研究中具有良好的适用性,后续数值模拟均基于该模型开展。

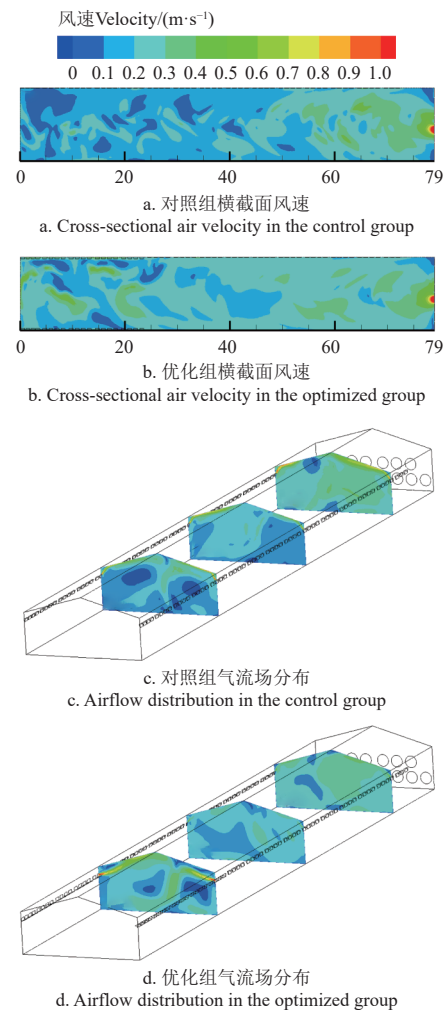
2.2.2 运行3台风机工况

图10显示了运行3台风机工况时,进风口分区调控对舍内气流场分布的影响。结果表明,在对照组中横截面平均风速为0.19 m/s,气流分布不均现象较为突出。对照组前端气流场存在多处通风死角,且未形成有效回流区域。当前区进风口开启角度调整至70°后,流场特征发生明显变化,横截面平均风速提升至0.24 m/s,前区通风弱区面积大幅缩减。具体而言,舍前端截面风速由0.19 m/s升至0.27 m/s,相对增幅达42.1%;中部区域风速亦有小幅提升(+0.02 m/s)。尽管舍后端风速有所降低,但整舍气流分布均匀性改善,有助于维持舍后端鸡只的热平衡状态。这一变化规律与进风口角度对气流特性的影响机制相符,增大前区进风口角度可扩大有效进风面积,使总进风量相应增加,从而有效改善了舍前部通风弱区,提升了整舍气流分布的均匀性。同时,优化组的CFD模拟结果表明,大进风口开启角度($\theta=70^\circ$)会诱发侧墙区域的大尺度回流,这与PENG等^[5]研究中鸡舍流场演化规律一致。

2.2.3 运行4台风机工况

在运行4台风机工况时,对照组横截面平均风速为0.26 m/s,较运行3台风机有所提升,但流场均匀性仍有待改善。将前区进风口开启角度增至90°后,纵向截面平均风速提升至0.31 m/s,舍前、中区域风速明显改善,仅前端两侧及中部局部存在通风弱区。舍前端截面风速由0.23 m/s升至0.34 m/s,舍中部风速小幅增加,后端风速基本不变。值得注意的是,在优化组工况中,舍前

端截面风速高于舍中部(图11),这主要是由于前区进风口角度增大后进风速度提升,而舍中、后部进风口角度未作调整,其进风速度相对较低所致。在实际养殖环境中,舍中部笼区风速通常高于前端。同时,该工况下舍前端出现了大范围回流区域,这一流场结构与曹孟冰等^[24]的研究结论相符,该研究指出,当射流出口速度较小时,射流无法形成贴附射流,其流型可能向下呈钟形投射而直接进入工作区。上述CFD模拟结果与此描述具有较好的一致性。综上,在实际生产中,可通过增大前区进风口开启角度提升舍内整体风速,从而改善HSVS鸡舍前端的气流分布均匀性。



注: 对照组前中后开启角度全为20°, 优化组前中后开启角度为70°、20°、20°。

Note: In the control group, the θ of the front, middle and rear inlets were all set at 20°. In the optimized group, the θ were set at 70°, 20° and 20° respectively.

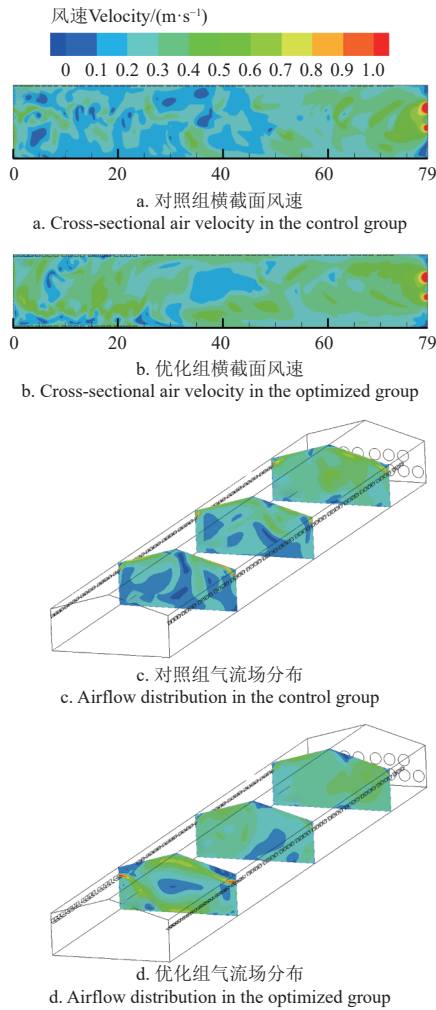
图10 进风口分区调控对舍内气流场分布的影响

Fig.10 Effects of zoned regulation of inlets on airflow field distribution

2.3 气流场均匀性优化效果

图12显示了不同前区进风口开启角度对截面平均风速的影响,结果表明,当前区进风口角度增加时,舍整体风速均匀性都有所提升,运行风机数量不影响风速提升效果。运行3台风机且进风口开启角度均为20°时,整舍风速呈现“前低后高”的分布特征,截面平均风速

最大值出现在距无风机山墙 70 m 处 (0.32 m/s)，最小值出现在距无风机山墙 5 m 处 (0.16 m/s)，全舍不均匀系数为 0.20。先前研究表明不均匀系数越低表示环境参数分布越均匀^[21]，但将前区进风口角度由 20° 提升至 70° 后，整舍风速波动范围为 0.22~0.28 m/s，舍内平均风速为 (0.25±0.02) m/s，均匀系数降低至为 0.08。运行 4 台风机且进风口开启角度均为 30° 时，距无风机山墙 70 m 处截面平均风速可达 0.38 m/s，全舍风速不均匀系数为 0.17。将前区进风口角度由 30° 增至 90° 后，截面平均风速由 0.38 m/s 略降至 0.36 m/s，但不均匀系数由 0.17 降低至 0.07，舍平均风速由 (0.28±0.05) m/s 提升至 (0.32±0.02) m/s，舍内流场分布得到有效改善。其机理在于：该角度增加可缩短贴附射流长度，促使更多自由射流进入笼养区域，从而提升笼内风速并增强整舍气流的均匀性。结合实测数据与 CFD 模拟结果，进一步验证了通过增大前区进风口开启角度来优化舍内流场分布，是一种经济可行的技术路径。

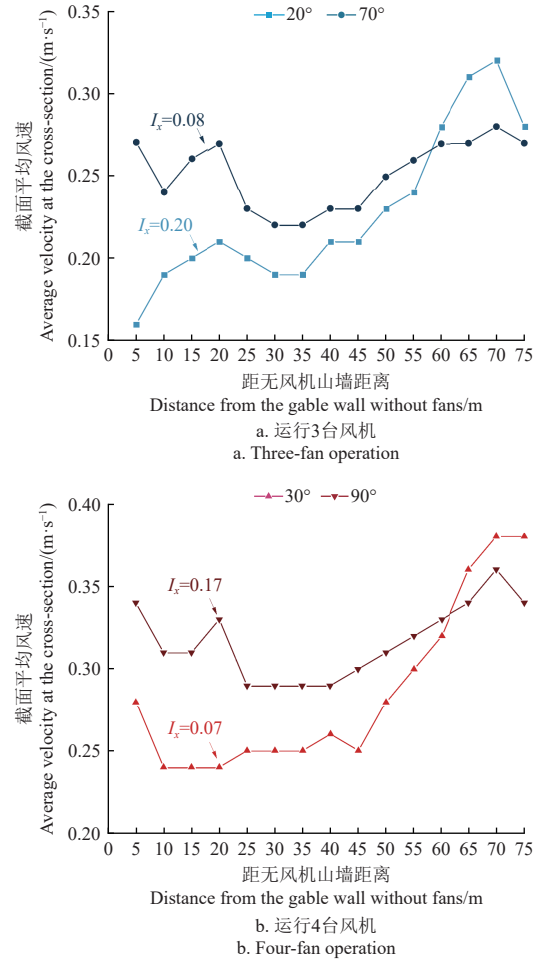


注：对照组前中后开启角度全为 30°，优化组前中后开启角度为 90°、30°、30°。

Note: In the control group, the θ of the front, middle and rear inlets were all set at 30°. In the optimized group, the θ were set at 90°, 30° and 30° respectively.

图 11 进风口分区调控对舍内气流场分布的影响

Fig.11 Effects of zoned regulation of inlets on airflow field distribution



注：数据经模拟验证后由 CFD-POST 提取获得。

Note: The data were extracted from CFD-POST following validation via simulation.

图 12 不同前区进风口开启角度对截面平均风速的影响

Fig.12 Effects of different θ of front inlets on average cross-sectional air velocity

3 讨论

本研究通过调整前区进风口开启角度以优化舍内气流组织，实测结果表明，当前区进风口角度增至 70° (3 台风机) 或 90° (4 台风机) 时，舍前部通风弱区问题明显改善。侧墙进风口、天花板吊顶与出风口之间的耦合作用使得舍内气流分布极为复杂。为更准确地解析这一复杂空气动力学环境^[12,25]，本研究借助 CFD 模拟对鸡舍气流场进行系统分析。CFD 模拟进一步揭示，增大前区角度可缩短贴附射流长度，使更多自由射流进入笼区，从而增加笼内风速、提升整舍气流均匀性。这一机制与本研究不均匀系数从 0.20 降至 0.08 (3 台风机) 及从 0.17 降至 0.07 (4 台风机) 的结果相吻合。现有鸡舍通风研究多聚焦于进风口出射射流特性与风机性能量化计算^[13-14,26]，对舍内整体流场的系统性分析相对有限^[27]，本研究的实测与模拟结合方法在此方面显示出优势。

笼内风速受到进风口开启角度、通风等级和空间位置的共同影响，精准把控射流特性是实现动物区气流环境优化的关键^[28]。本研究采用分区调控进风口的策略，有效改善了鸡舍流场分布不均的问题 (图 10、图 11)，

但结果表明,运行3台风机时前区进风口70°开启、4台风机时90°开启,舍内气流均匀性达到最优。最佳进风口开启角度不同可能是由于大角度“厚”气流虽提升了进风量,但容易在一侧形成大回流区域,不同通风等级下气流组织的平衡点存在差异。PENG等^[5]研究中也认为单纯的增大角度或增加风机开启量,并不能有效改善舍内流场分布。LI等^[29]发现,进风口距地高度越小,送风气流在活动区的动量保持越持久,但回流范围相应缩小,这与本研究中角度增大导致贴附射流缩短、自由射流增强的现象相互印证。

鸡只是热量和气流阻力的主要来源,本研究旨在创新研究侧墙小窗进风纵向通风鸡舍流场分区调控优化方法,实测阶段舍内未饲养鸡只,模拟过程亦未考虑鸡只与环境间的热质交换,主要基于两点考量:一是鸡舍在舍内外压差过大等极端工况下,易出现舍内空气流通不畅的问题,进而导致鸡只局部区域空气质量恶化,威胁其呼吸健康;二是已有研究表明,即便忽略鸡只阻力,仍可精准计算射流距离与静压分布,能够支撑本研究围绕进风口角度调控效果得出的核心结论^[12,30]。同时,本研究CFD模拟结果显示,舍内进风口气流可形成稳定的贴附射流;相关研究亦证实,建筑高度较低时,贴附射流在运动过程中速度衰减缓慢,能够持续保持较高动量^[31]。这也合理解释了鸡舍进风气流自天花板沉降至笼区的过程中,射流抵达舍前中区的动量并未被削弱,本试验所得最优进风角度在实际养殖条件下仍具有适用性。

综上所述,本研究基于实测与CFD模拟相结合的方法,揭示了前区进风口角度对HSVS鸡舍流场分布的影响规律,明确了分区调控策略在不同通风等级下的优化效果。上述发现为HSVS鸡舍的设计优化与环境调控提供了重要理论依据。后续研究将在更多地区开展验证,并在此基础上进一步改进环控方案,纳入热质交换、地域气候差异等因素,构建面向不同季节的综合智能控制策略,最终实现鸡只舒适度与养殖效益的协同提升。

4 结 论

本研究基于射流特性,通过实测不同前区进风口开启角度对舍内气流组织影响,结合CFD模拟进一步挖掘进风口分区调控在优化侧墙小窗进风纵向通风系统规模化鸡舍通风中气流组织的作用效果。得到的主要结论如下:

1) 开启3台或4台风机时舍内外压差总体呈现相同的变化趋势,增加前区进风口开启角度可降低鸡舍压差且仍分布均匀,鸡舍中部平均压差较前端高 (1.7 ± 0.2) Pa。

2) 增加前区进风口角度可明显改善舍前部通风弱区问题,且对中部风速一定提升作用,舍内风速不均匀系数随开启角度增加不断降低。运行3台风机时,不均匀系数由0.20降至0.08,运行4台风机时,不均匀系数由0.17降至0.07,平均风速由 (0.28 ± 0.05) m/s升至 (0.32 ± 0.02) m/s。

3) CFD模拟结果表明,为优化横纵舍平面前端风速低且存在多处通风死角。将前区角度增至70°(3台风机)或90°(4台风机)后,纵向截面平均风速分别由0.19 m/s升至0.24 m/s、由0.26 m/s升至0.31 m/s,舍后

端风速无明显变化。

4) 当前区进风口角度增加时,贴附射流长度降低,更多自由射流运动至笼区,笼内风速增加,经济有效提高整舍气流均匀性,且运行风机数量不影响优化效果。

本研究表明增加前区进风口开启角度优化流场在环控策略推广应用具有可行性,但因试验周期及测试环境限制,该通风策略下鸡只产蛋率、饲料转化率的影响还有待进一步研究。

[参 考 文 献]

- [1] 朱丽慧,朱根生,吴宁,等.高密度层叠式饲养模式下蛋鸡热应激观察及经济损失研究[J]. 中国家禽, 2017, 39(17): 35-40.
ZHU Lihui, ZHU Gensheng, WU Ning, et al. Impact of heat stress on laying production and economic costs of high-density fed layers keeping in cascading cages[J]. China Poultry, 2017, 39(17): 35-40. (in Chinese with English abstract)
- [2] 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 Yang, ZHENG Weichao, LI Xuanyang, 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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(21): 202-207. (in Chinese with English abstract)
- [3] WANG Y, ZHENG W, LI B, et al. A new ventilation system to reduce temperature fluctuations in laying hen housing in continental climate[J]. Biosystems Engineering, 2019, 181: 52-62.
- [4] 郑炜超,葛绍娟,王阳,等.规模鸡场环境调控关键技术与装备研究进展[J]. 中国家禽, 2023, 45(11): 1-10.
ZHENG Weichao, GE Shaojuan, WANG Yang, et al. Research progress on environmental control key technologies and equipment of large-scale poultry farms[J]. China Poultry, 2023, 45(11): 1-10. (in Chinese with English abstract)
- [5] PENG H, LI B, CHEN C, et al. Effects of sidewall inlet parameters on the airflow and temperature field in poultry houses with an alternative ventilation system[J]. Journal of the ASABE, 2025, 68(1): 37-50.
- [6] WEBSTER A, CZARICK M. Temperatures and performance in a tunnel-ventilated, high-rise layer house[J]. Journal of Applied Poultry Research, 2000, 9(1): 118-129.
- [7] 李保明,王阳,郑炜超,等.中国规模化养鸡环境控制关键技术与设施设备研究进展[J]. 农业工程学报, 2020, 36(16): 212-221.
LI Baoming, WANG Yang, ZHENG Weichao, et al. Research progress in environmental control key technologies, facilities and equipment for laying hen production in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(16): 212-221. (in Chinese with English abstract)
- [8] ZHANG G, BJERG B, SVIDT K, et al. Measurements of isothermal compact ceiling jets generated by rectangular wall inlets[J]. Biosystems Engineering, 2002, 82(4): 463-468.

- [9] CHOI Y, KIM J, CHO J, et al. Estimation of ventilation rate in a piglet house considering ventilation system characteristics[J]. *Biosystems Engineering*, 2023, 227: 1-18.
- [10] PARK G, LEE I, YEO U, et al. Ventilation rate formula for mechanically ventilated broiler houses considering aerodynamics and ventilation operating conditions[J]. *Biosystems Engineering*, 2018, 175: 82-95.
- [11] 房俊龙, 吴爽, 吴志东, 等. 保育猪舍垂直通风 CFD 模拟及挡风板优化设计[J]. *东北农业大学学报*, 2022, 53(5): 59-68. FANG Junlong, WU Shuang, WU Zhidong, et al. CFD simulation of vertical ventilation and optimal design of wind shield in nursery pig house[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2022, 53(5): 59-68. (in Chinese with English abstract)
- [12] KWON K, LEE I, ZHANG G, et al. Computational fluid dynamics analysis of the thermal distribution of animal occupied zones using the jet-drop-distance concept in a mechanically ventilated broiler house[J]. *Biosystems Engineering*, 2015, 136: 51-68.
- [13] OLIVEIRA J, RAMIREZ B, XIN H, et al. Ventilation performance and bioenergetics of dekalb white hens in a modern aviary system[J]. *Biosystems Engineering*, 2020, 199: 149-161.
- [14] ROSA E, ARRIAGA H, CALVET S, et al. Assessing ventilation rate measurements in a mechanically ventilated laying hen facility[J]. *Poultry Science*, 2019, 98(3): 1211-1221.
- [15] AL-DAWOOD A, BÜSCHER W. Air velocity produced by different types of mixing and ceiling fans to reduce heat stress in poultry houses[J]. *International Journal of Agriculture and Forestry*, 2014, 3(4): 145-153.
- [16] CASEY K, GATES R, WHEELER E, et al. On-farm ventilation fan performance evaluations and implications[J]. *Journal of Applied Poultry Research*, 2008, 17(2): 283-295.
- [17] 陈辰, 王阳, 彭海青, 等. 间歇通风策略在西北地区夏季蛋鸡舍应用效果[J]. *农业工程学报*, 2024, 40(18): 184-193. CHEN Chen, WANG Yang, PENG Haiqing, et al. Evaluating the intermittent ventilation of summer poultry house in Northwest China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2024, 40(18): 184-193. (in Chinese with English abstract)
- [18] TONG X, HONG S, ZHAO L. Using CFD simulations to develop an upward airflow displacement ventilation system for manure-belt layer houses to improve the indoor environment[J]. *Biosystems Engineering*, 2019, 178: 294-308.
- [19] 李宗刚. 叠层笼养蛋鸡舍粉尘和细菌排放特征及减排技术研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2020, 39-40. LI Zonggang. Study on Emission Characteristics and Reduction Technology of Dust and Airborne Bacteria from Layer Hen House with Stacked-Cage System[D]. Beijing: China Agricultural University, 2020, 39-40. (in Chinese with English abstract)
- [20] MA H, TU Y, YANG X, et al. Influence of tunnel ventilation on the indoor thermal environment of a poultry building in winter[J]. *Building and Environment*, 2022, 223: 109448.
- [21] 王朝元, 马晓春, 党昊昱, 等. 严寒地区混合垂直通风猪舍环境质量评价[J]. *农业工程学报*, 2024, 40(11): 204-211. WANG Chaoyuan, MA Xiaochun, DANG Haoyu, et al. Evaluating the indoor environment quality of pig house with hybrid ventilation system in the severe cold region[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2024, 40(11): 204-211. (in Chinese with English abstract)
- [22] QI F, ZHAO X, SHI Z, et al. Applicability evaluation of innovative simplified methods of slatted floor in pig houses: A CFD study[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2024, 216: 108532.
- [23] 郭中旭. 基于 CFD 模拟的叠层笼养鸡舍侧墙小窗优化研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2023, 30-44. GUO Zhongxu. Optimization Study of Windows in Side Wall of Stacked Cage Chicken House Based on CFD Simulation[D]. Beijing: China Agricultural University, 2023, 30-44. (in Chinese with English abstract)
- [24] 曹孟冰, 杨婷, 宗超, 等. 进风口高度与导流板角度对猪舍空气龄和 CO₂ 分布的影响[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(S2): 427-434, 441. CAO Mengbing, YANG Ting, ZONG Chao, et al. Influence of air inlet height and angle on air age and CO₂ distribution in pig house[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(S2): 427-434, 441. (in Chinese with English abstract)
- [25] CHENG Q, FENG H, MENG H, 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.
- [26] LIU G, LIU M. Development of simplified in-situ fan curve measurement method using the manufacturers fan curve[J]. *Building and Environment*, 2012, 48: 77-83.
- [27] ELGHARDOUF N, LAHLOUH I, ELAKKARY A, et al. Towards modelling, and analysis of differential pressure and air velocity in a mechanical ventilation poultry house: Application for hot climates[J]. *Heliyon*, 2023, 9(1): e12936.
- [28] 葛绍娟, 李书磊, 庞超, 等. 地道式精准通风母猪舍夏季热环境数值模拟及优化[J]. *农业工程学报*, 2025, 41(21): 231-239. GE Shaojuan, LI Shulei, PANG Chao, et al. Simulating and optimizing the summer thermal environment in the tunnel sow house under precision ventilation[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2025, 41(21): 231-239. (in Chinese with English abstract)
- [29] LI T, ESSAH E, WU Y, et al. Numerical comparison of exhaled particle dispersion under different air distributions for winter heating[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2023, 89: 104342.
- [30] YI Q, ZHANG G, KÖNIG M, et al. Investigation of discharge coefficient for wind-driven naturally ventilated dairy barns[J]. *Energy and Buildings*, 2018, 165: 132-140.
- [31] 韩欧. 贴附通风气流运动特性及冷负荷计算方法研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2023, 25-38. HAN Ou. Study on Wall-Attached Jet Flow Characteristics and Coolingload Calculation Method for Attachment Ventilation[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2023, 25-38. (in Chinese with English abstract)

Optimizing flow field uniformity in poultry houses with a holistic sidewall ventilation system

PENG Haiqing^{1,2,3,4}, LI Fuwei^{1,2,3}, LI Dapeng^{1,2,3}, WANG Yang^{4,5,6}, LI Hao^{4,5,6},
ZHENG Weichao^{4,5,6}, LI Baoming^{4,5,6*}

(1. Poultry Institute, Shandong Academy of Agricultural Science, Jinan 250100, China; 2. Shandong Provincial Key Laboratory of Livestock and Poultry Breeding, Jinan 250100, China; 3. Jinan Key Laboratory of Poultry Germplasm Resources Innovation and Healthy Breeding, Jinan 250100, China; 4. College of Water Resources and Intelligence Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China; 5. Key Laboratory of Agricultural Engineering in Structure and Environment, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100083, China; 6. Beijing Engineering Research Center for Livestock and Poultry Healthy Environment, Beijing 100083, China)

Abstract: Holistic sidewall ventilation system (HSVS) is characterized by uniform temperature distribution in the poultry house. Yet two challenges remain: low air velocity at the front cross-section and suboptimal positions of recirculation zones in large-scale facilities. The airflow field is governed by the configuration and regulation of air inlets. In this study, the airflow distribution was optimized to enhance overall ventilation performance in HSVS poultry houses. The opening angles of local front inlets were also adjusted using field measurements and numerical simulations. A systematic analysis was implemented to explore the effects of inlet angles on the airflow field. A full-scale HSVS poultry house was selected as the research object, where 118 sidewall air inlets were divided into front, middle, and rear segments (40, 40, and 38 inlets, respectively). Two ventilation scenarios (with 3 and 4 operational fans) were evaluated, wherein the opening angles of the front inlets were adjusted within the range of 10° to 90°, whereas the middle and rear air inlets were kept at fixed angles to match the ventilation scenarios. Air velocity and pressure difference were continuously measured at 6 sensor points in the laying hen activity zone (1.5 m above the ground). Computational fluid dynamics (CFD) incorporated with the Reynolds-averaged Navier-Stokes (RNG) $k-\varepsilon$ turbulence model was adopted to simulate the airflow field. The air velocity non-uniformity coefficient was employed as the evaluation metric to quantify the uniformity of airflow distribution. The results showed that different ventilation scenarios displayed an identical variation trend. The opening angle of the front air inlets reduced the static pressure difference between the inlets and the outdoors, while preserving a uniform distribution of pressure difference. The average pressure difference in the middle section of the poultry house was higher than that at the front end, with an average difference of (1.7±0.2) Pa. This discrepancy was also independent of both the inlet opening angle and the ventilation scenario. Meanwhile, air velocity increased with an increase in the opening angle of the front air inlets, indicating a negative correlation with pressure difference. Under the scenario with 3 operational fans, the maximum average air velocity in the front and middle segments reached (0.18±0.02) m/s (at 70°) and (0.30±0.06) m/s (at 90°), respectively; Under the scenario with 4 operational fans, these values were (0.25±0.04) m/s (at 90°) and (0.38±0.06) m/s (at 90°), respectively. Furthermore, the front inlet opening angle was adjusted to alleviate inadequate ventilation in the front section of the house, indicating a moderate improvement in air velocity in the middle section. The air velocity non-uniformity coefficient decreased consistently, as the inlet angle increased, thus dropping to below 0.30 at the angle of 70° or larger (0.24 for 3 fans and 0.30 for 4 fans at 70°). Subsequently, two optimal operating conditions were selected for further CFD simulation analysis. CFD simulation results showed that the front inlet angles enhanced the overall indoor air velocity, where the average air velocity at the front cross-section increased by 0.10 m/s. The optimal inlet angles effectively mitigated front ventilation dead zones for the airflow uniformity, indicating less unfavorable recirculation zones. The opening angle of the front air inlets was adjusted to 70° or larger for the weak ventilation zone at the front of HSVS poultry houses, indicating indoor airflow uniformity. Zoning regulation of air inlet angles can offer a cost-effective and efficient solution to enhance the ventilation performance of HSVS poultry houses. The finding can provide the theoretical basis and technical support for environmental control optimization in large-scale poultry houses. Future research can be expected to integrate the heat and mass exchange between hens and the environment in smart agriculture.

Keywords: poultry house; ventilation system; inlet; flow field; numerical simulation; airflow optimization