

DOI: 10.13733/j.jcam.issn.2095-5553.2024.10.010

李建丽, 程雪, 王娟. 基于CFD的冬季房舍式牛舍湿热环境模拟及优化[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(10): 69-75, 81

Li Jianli, Cheng Xue, Wang Juan. Simulation and optimization of hot and humid environment in winter house-type cowshed based on CFD [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(10): 69-75, 81

基于CFD的冬季房舍式牛舍湿热环境模拟及优化*

李建丽^{1,2}, 程雪^{1,2}, 王娟^{1,2}

- (1. 河北农业大学机电工程学院, 河北保定, 071001;
2. 河北省畜禽养殖智能装备与新能源利用重点实验室, 河北保定, 071001)

摘要:为研究北方寒地房舍式牛舍风速场、温度场和相对湿度场的分布规律,应用计算流体力学(CFD)方法,对冬季河北省承德市的房舍式牛舍的风速场、温度场和相对湿度场进行三维数值模拟。结果表明:南北相对的两个通风口在自然通风模式下,过道处风速在0.5~1.60 m/s之间,牛只活动区域风速基本保持在0~0.4 m/s之间,大部分区域风速在0.1 m/s以下,舍内气流分布不均匀。牛舍内的平均温度在10.7℃左右,牛只活动区域的相对湿度基本保持在50%~60%之间。在牛舍既有结构不变的情况下对牛舍通风口的位置和数量进行改进,优化通风方案后牛舍内风速在0.1~0.6 m/s之间,基本没有通风死角。实测值与模拟值的归一化均方误差(NMSE)值小于0.25,说明现场实测与数值模拟有较好的吻合度,能够为我国北方寒地房舍式牛舍环境情况评估和通风方案优化提供有益参考。

关键词:计算流体力学;房舍式牛舍;湿热环境;数值模拟;通风优化

中图分类号:S823 文献标识码:A 文章编号:2095-5553(2024)10-0069-08

Simulation and optimization of hot and humid environment in winter house-type cowshed based on CFD

Li Jianli^{1,2}, Cheng Xue^{1,2}, Wang Juan^{1,2}

- (1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Hebei Agricultural University, Baoding, 071001, China;
2. Hebei Key Laboratory Intelligent Equipment and New Energy Utilization of Livestock and Poultry Breeding, Baoding, 071001, China)

Abstract: In order to study the distribution law of wind speed, temperature and relative humidity field of the house-type cowshed in the cold region of north China, the computational fluid dynamics (CFD) method is used to simulate the wind speed, temperature and relative humidity of a house-type cowshed in Chengde, Hebei Province in winter. The simulation results show that under the natural ventilation mode, the wind speed in the passageway is 0.5-1.60 m/s, the wind speed in the cattle movement area is basically between 0-0.4 m/s, and the wind speed in most areas is below 0.1 m/s, and the air distribution in the cowshed is not uniform. The average temperature in the cowshed is about 10.7℃, and the relative humidity in the cattle movement area is basically kept 50%-60%. Under the condition that the existing structure of the cowshed remains unchanged, the position and number of the ventilation vents in the cowshed are improved. After the optimization of the ventilation scheme, the wind speed in the cattle barn is 0.1-0.6 m/s, and there is basically no dead angle of ventilation. The normalized mean square error (NMSE) values of the measured and simulated values are both less than 0.25, indicating that the field measurement has a good agreement with the numerical simulation. This study can provide useful reference for environmental assessment and ventilation scheme optimization of house-type cowsheds in cold regions of northern China.

Keywords: CFD; house-type cowshed; hot and humid environment; numerical simulation; ventilation optimization

收稿日期:2023年2月19日 修回日期:2023年3月11日

* 基金项目:河北省重点研发计划项目(19227213D);河北省省属高等学校研究项目(KY2021018)

第一作者:李建丽,女,1996年生,河北承德人,硕士研究生;研究方向为智能化检测与自动控制技术。E-mail: 919236245@qq.com

通讯作者:王娟,女,1981年生,石家庄人,博士,副教授;研究方向为检测技术与智能装备、图像处理与模式识别技术。E-mail: wangjuan@hebau.edu.cn

0 引言

随着畜牧业的规模化发展,畜禽舍环境质量越来越受到人们的重视。畜禽养殖场内气流、温度、湿度及各种气体等直接影响畜禽日常行为、生长速度和免疫状态^[1-3]。牛舍环境质量的好坏直接关系到奶牛的身体与健康与福利水平,也影响着奶牛的生产性能和牛奶品质^[4,5]。畜禽舍内的湿热环境因子包括风速、温度与相对湿度,畜禽个体热舒适性是这三个热环境因子的综合效应^[6,7]。在中国北方寒地,冬季的牛舍内大多数都存在温度低、湿度高以及空气质量差等问题^[8,9]。

畜禽舍室内环境参数具有非线性、多输入多输出和呈动态变化等特点,导致难以进行控制。许多学者对此进行了研究,提出了微型气候环境调控方法,如模糊控制、最优控制和预测控制等,MatLab和Ansys Fluent等仿真软件也逐渐用于环境模型的建立^[10]。李昊等^[11]利用MatLab进行了畜禽舍环境模拟,但误差较大。由于舍内环境的复杂性和动态性,建立有效的环境模型和稳定的控制算法已经成为环境预测模拟中的难点和关键点^[12]。随着计算机技术的发展,计算流体力学(Computational Fluid Dynamics,CFD)与畜禽舍环境监测相结合已经成为一项研究热点^[13]。许多学者^[14-18]使用CFD对畜禽舍内气流、温湿度、二氧化碳、氨气和甲烷等的分布情况进行了三维数值模拟。应用CFD技术可以大量节省测量时间和重复劳动,减少测量装备,且得到的可视化云图可以更好地了解畜禽舍的风速场、温度场和相对湿度场的分布及扩散规律,帮助畜禽场工作人员更好地进行管理。CFD方法具有成本低、耗时短和更直观等优点,应用越来越广泛。

目前,国内基于CFD的畜禽舍内环境模拟的研究处于探索阶段,主要集中在通风和温度场研究中^[19-21]。本文应用CFD方法,对冬季河北省承德市的房舍式牛舍的风速场、温度场和相对湿度场进行三维数值模拟及优化,为中国北方寒地房舍式牛舍环境情况评估和通风方案优化提供有益参考。

1 材料与方法

1.1 试验牛舍原型

试验牛舍位于河北省承德市丰宁满族自治县,如图1所示。牛舍内部长26 m、宽16 m、高3.5 m,呈南北走向,为典型的双排式,牛舍内东西两列布局对称,每列有7个单元间,平均每个单元间内有7头牛,中间为宽2 m的过道。在南墙和北墙中间位置分别为宽2 m高1.8 m的门,其上方0.2 m处分别有一个通风口,通风口为边长1 m的矩形。



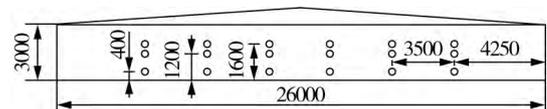
图1 试验牛舍

Fig. 1 Experimental cowshed

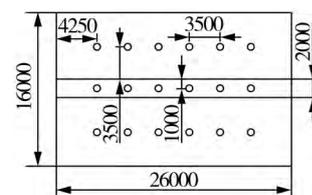
1.2 牛舍湿热环境参数现场测量

该试验时间为2021年10月19—29日的09:00—12:00,室外平均气温为7℃~9℃,相对湿度为40%左右,是冬季典型的温湿度水平,期间牛舍内外环境的测量可以有效地评估牛舍环境的舒适性与合理性。本试验采用热敏式多功能风速—温湿度测量仪(SW6086型,检测限为0.01 m/s,0.1℃,0.1%)测量牛舍内的温度、相对湿度和风速。采用红外线测温仪(SW309 S型,检测限为0.1℃)测量牛舍建筑的内表面温度和牛体表温度。

牛舍的测量点位分布在垂直方向上如图2(a)所示,在水平方向上如图2(b)所示。图2中圆点代表仪器测量点。垂直方向上的测量点位高度分别为 $H=0.4$ m(牛俯卧时的呼吸高度)、 $H=1.2$ m(牛正常的呼吸高度)和 $H=1.6$ m(牛场工人的呼吸高度)。在水平方向选取过道和西侧均布的6个测量点(由于对称性故只测量西侧即可),即每个水平方向总共需要测量12个点的数据。每个测量点测3次取平均值,测量间隔为1 min。



(a) 测量点位垂直方向分布图



(b) 测量点位水平方向分布图

图2 牛舍内测量点分布图

Fig. 2 Distribution map of measuring points in the cowshed

2 CFD模型构建

2.1 计算域的选择与网格划分

使用SolidWorks 2017软件进行牛舍三维几何建模,如图3所示。为了降低建模和网格划分的难度,减少计算机的模拟时间,提高计算效率,在不影响模拟结果的情况下,根据查阅文献^[22]及前人经验对试验牛舍的物理建模进行如下简化:(1)牛舍中的栅栏、栏杆式的限位栏等对温度和有害气体扩散的阻力极小,在建立模型

时省略；牛舍门在大部分情况下都处于关闭状态，对模拟结果影响很小，在建模时省略；(2)将不规则的牛只简化为恒温发热的立方体模型；(3)忽略牛舍中墙体、屋顶、地板的厚度，同一侧墙体不同位置的温度视为相同。

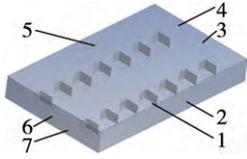


图 3 牛舍计算域

Fig. 3 Cowshed computational domain

1.牛体 2.东墙 3.出口 4.北墙 5.西墙 6.入口 7.南墙

使用 ICFM CFD 15.0 对牛舍三维模型进行网格划分，划分后的网格如图 4 所示。整体的网格数量为 2 964 931 个，满足网格的质量要求。



图 4 计算域网格

Fig. 4 Computational domain grid

2.2 CFD 数值模型的选择

2.2.1 基本控制方程

牛舍内温度相对变化不大，气体流动缓慢，假设牛舍内的气体是连续的、稳定的、不可压缩的牛顿流体，则牛舍内气体流动符合物理守恒定律，控制方程是物理守恒定律的数学描述。根据质量守恒方程(单位时间内流体微元体中质量的增加等于同一时间间隔内流入该微元体的净质量)、动量守恒方程(微元体中流体动量对时间的变化率等于外界作用在该微元体上的各种力之和)、能量守恒方程(微元体中能量的增加率等于进入微元体的净热流量加上体积力与面积力对微元体所做的功)和组分守恒方程(系统内某种化学组分质量对时间的变化率，等于通过系统界面净扩散流量与通过化学反应产生的该组分的生产率之和)构成了牛舍环境模拟的基本控制方程^[23]，分别如式(1)~式(4)所示。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho v) = S_m \quad (1)$$

式中： S_m ——质量源， kg/m^3 ；

ρ ——密度， kg/m^3 ；

t ——时间， s ；

v ——速度， m/s 。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \nabla(\rho v v) = -\nabla p + \nabla(\bar{\tau}) + \rho g + F \quad (2)$$

式中： p ——压力， Pa ；

$\bar{\tau}$ ——应力张量， Pa ；

F ——外力， N/m^3 ；

g ——重力加速度， m/s^2 。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla[v(\rho E + \rho)] = \nabla[k_{\text{eff}}\nabla T - \sum_j h_j J_j + (\bar{\tau} v)] + S_h \quad (3)$$

式中： E ——总能量， J ；

k_{eff} ——传热系数；

h_j ——比焓， J/kg ；

J_j ——扩散通量组分， $\text{kg}/(\text{m}^2/\text{s}^2)$ ；

S_h ——总熵， J/C° ；

T ——温度， C° 。

$$\frac{\partial \rho_c}{\partial t} + \text{div}(\rho_{uc}) = \text{div}[D_s \text{grad}(\rho_c)] + S \quad (4)$$

式中： ρ_{uc} ——该组分的体积浓度；

ρ_c ——该组分的质量浓度；

D_s ——该组分的扩散系数；

S ——生产率，即系统内部单位时间内单位体积通过化学反应产生的该组分的质量。

2.2.2 湍流模型

综合考量本文用到的软件、硬件以及前人的研究经验后，在牛舍的环境模拟与评估上选用适用性和精确性都比较高的重整化 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型^[23]，其中 k 方程和 ϵ 方程分别如式(5)、式(6)所示。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j}) + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\alpha_\epsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j}) + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} - R_\epsilon + S_\epsilon \quad (6)$$

式中： k ——湍流动能， m^2/s^2 ；

ϵ ——湍流耗散率， m^2/s^3 ；

x_i, x_j —— i, j 坐标；

μ_i ——湍流黏度， $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ；

μ_{eff} ——有效黏度， $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ；

G_k ——平均速度梯度引起的湍流动能， $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s}^2)$ ；

G_b ——浮力引起的湍流动能， $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s}^2)$ ；

Y_M ——在可压缩湍流中对整体耗散率的贡献， $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s}^2)$ ；

α_k —— k 的逆效普朗特常数；

α_ϵ —— ϵ 的逆效普朗特常数；

$R_\epsilon, C_{1\epsilon}, C_{2\epsilon}, C_{3\epsilon}$ ——常数；

S_k, S_ϵ ——用户自定义源项。

2.3 边界条件

在本次模拟过程中,试验时外界温度稳定,风速均匀,牛舍封闭性良好,故可以认为牛舍内环境是处于稳态的,选择模拟状态为稳态模拟;选择重整化群 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型;出入口、围护结构和牛体表面的边界条件设置如表1所示。

表1 边界条件定义及设置
Tab. 1 Boundary condition definition and setting

变量	边界类型	边界条件
入口	速度入口	风速:1.29 m/s,温度:7.5℃,相对湿度:35%
出口	压力出口	温度:7.6℃,相对湿度:31%
围护结构	无滑移壁面	东墙温度:4.5℃,西墙温度:5.2℃,南墙温度:4.8℃,北墙温度:4.1℃,屋顶温度:13.4℃,地板温度:4.5℃
牛体表面	无滑移壁面	温度:30℃

3 模拟结果分析

3.1 风速CFD模拟结果分析

在高度上分别选取 $H=0.4$ m(牛俯卧时的呼吸高度)、 $H=1.2$ m(牛正常的呼吸高度)和 $H=1.6$ m(牛场工人的呼吸高度)进行研究。图5为整个牛舍在这三个水平高度的风速分布云图。

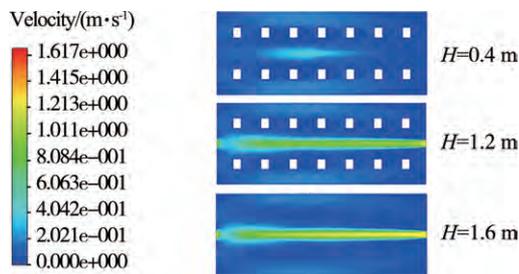


图5 不同水平高度风速分布云图

Fig. 5 Cloud map of wind speed distribution at different heights

根据本次模拟结果来看,牛舍内风速场的风速范围为 $0\sim 1.60$ m/s,最大风速位于进风口和整个过道处,由于气流从进风口进入,首先流经整个过道,导致过道处的风速较大,在 $0.5\sim 1.60$ m/s之间。因此,建议可以多增加几个通风口以改变现在的两个通风口的通风模式,不仅可以提高通风效率还可以改善现在存在的通风不均匀的问题。而在牛只的活动区域内风速较为稳定,大部分风速在 $0\sim 0.4$ m/s之间,靠近通风口和过道处风速有所上升,牛只活动的各个单元间内风速并无太大差别,基本满足牛只对冬季的通风需求。但是在牛只的活动区域内,存在气流停滞不流通的情况,有较多的通风死角,不能及时交换新鲜的空气,这对牛只生活的舒适度、身体健康程度和生产性能会产生不利影响。在冬季为牛只维持牛舍内的温度时,会

造成空气质量下降的情况,因此,在冬季对牛舍采取保温措施时,不仅要做强气流进行阻挡,而且要保证牛舍内适时且合理的通风换气,白天可以在保证牛舍内环境舒适的条件下适当提高气流流速,在夜间要降低气流流速以防寒保暖。

3.2 温度CFD模拟结果分析

在北方寒冷的冬季中,牛舍内的温度对于牛只的生产和健康极其重要。温度过低会导致牛只的散热速度过快,为了维持体温,牛只需要进食更多的饲料以用于抵消产热导致的能量消耗,不仅不能促进牛只的生长和发育,还会导致饲料的利用率降低。如图6所示,从牛舍内温度场的模拟结果来看,牛舍内的温度范围为 $4.2\sim 24.5$ ℃,在牛只的活动区域内,温度范围集中在 $11\sim 24.5$ ℃左右。由于牛只本身的呼吸作用和皮肤散热作用,牛只周围的温度远高于舍内其他区域,达到了 24.5 ℃左右,舍内的温度范围基本满足牛只对冬季环境温度的需求。根据模拟结果可以发现,通风口处和过道处的温度较低,比较风速分布云图和温度分布云图,温度的高低和风速的大小有显著的关系,风速越高的地方温度越低。因此,建议冬季时在通风口处加装保温帘,白天打开保温帘,保证牛舍内的空气流通并带走多余的水汽,夜晚关闭保温帘,降低气流流速,保证舍内的温暖。

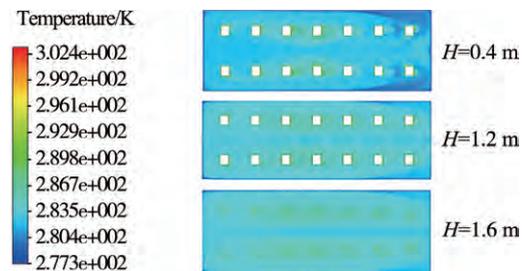


图6 不同水平高度温度分布云图

Fig. 6 Cloud map of temperature distribution at different heights

3.3 相对湿度CFD模拟结果分析

图7显示了牛舍内相对湿度场的模拟结果,相对湿度范围为 $35\%\sim 78\%$ 。虽然相对湿度范围的差距比较大,但是牛只活动区域内的相对湿度比较稳定,在 $50\%\sim 60\%$ 之间,这是由于牛舍内的水汽主要来源于牛只的呼吸作用和地板上未及时清理干净的粪尿。该范围内的相对湿度基本满足牛只对冬季牛舍内相对湿度的需求。在通风条件比较差的冬季,由于高度集约化的现代养殖模式,牛舍内的相对湿度普遍高于牛舍外,封闭且潮湿的环境更加适合微生物的繁殖,导致许多致病的微生物得以存活并传播,如常见的流感病毒等,造成牛只的减产甚至是生病。有研究表明在舍内温度为 4 ℃时,使用合适的通风系统和具有较好保温

性能的建筑围护结构可以有效地控制舍内湿度,在冬季为保障牛舍良好的环境条件,应该在提高建筑围护结构的同时,增加一定量的通风^[24]。

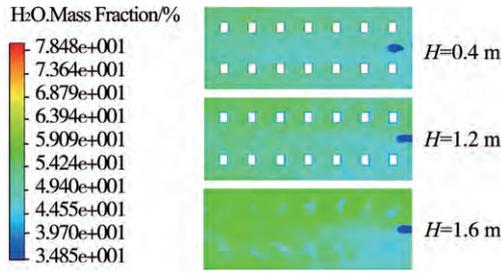


图 7 不同水平高度相对湿度分布云图

Fig. 7 Cloud map of relative humidity distribution at different heights

4 数值模拟结果验证

4.1 牛舍湿热环境现场测量参数分析

图 8 分别显示了图 2 所示的过道和西侧(牛舍内东西结构对称,故只分析一侧即可)测量点处的风速、温度和相对湿度的实测值,分析数据的测量点位高度为 $H=0.4\text{ m}$ (牛俯卧时的呼吸高度)、 $H=1.2\text{ m}$ (牛正常的呼吸高度)和 $H=1.6\text{ m}$ (牛场工人的呼吸高度)处。

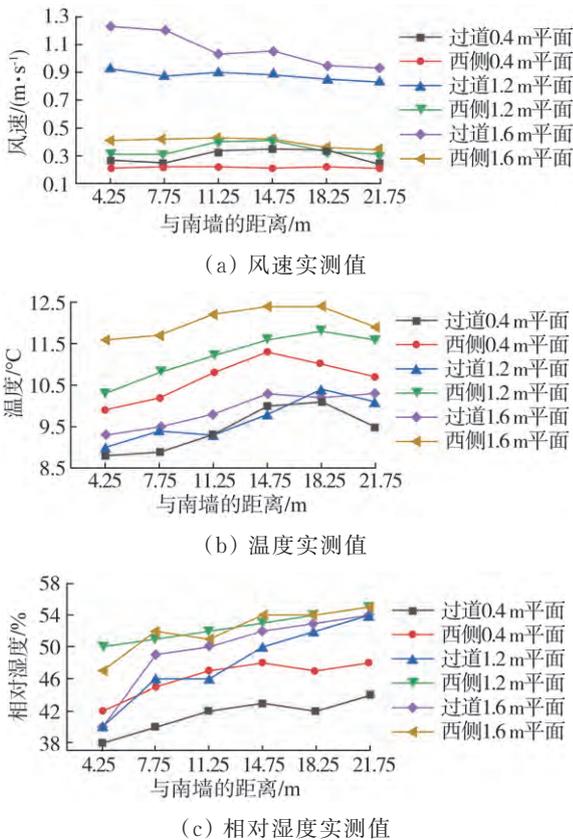


图 8 风速、温度和相对湿度实测值

Fig. 8 Measured value of wind speed, temperature and relative humidity

如图 8(a) 所示,西侧处的风速明显小于过道处,这是由于通风口位置正对过道。由于牛舍中的气流流

向为由南向北,风速由南到北主要呈递减趋势。通风口的高度为 2 m ,所以过道处的风速在 1.6 m 高度最大,在 0.4 m 高度最小。西侧处风速在 $0.2\sim 0.45\text{ m/s}$ 之间波动,风速变化不大气流平稳。总体来说牛舍内的整体气流趋势平稳,无较大波动。图 8(b) 显示了牛舍过道处和西侧处的温度测量值。牛舍内最低温度处位于过道最南侧,为 $8.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,因为此处靠近通风口,外界气流流入牛舍,气流流动带走了部分热量;最高温度位于西侧,为 $12.4\text{ }^{\circ}\text{C}$,可知西侧处温度均高于过道处,这是由于过道正对通风口风速较大,而西侧气流更为稳定。图 8(c) 为牛舍内过道处和西侧处的相对湿度测量值,测得相对湿度范围为 $38\%\sim 55\%$ 。过道处南侧相对湿度测量值最低为 38% ,这是由于此处靠近通风口,风速快湍流强度大,会带走大量空气中的水分,导致此处相对湿度较小,并且和其他测量点的测量值差异较大。因为过道处的风速值比西侧处的风速值大,所以过道处的相对湿度要小于西侧处。总体来说,牛只活动区域内的风速平均值为 0.35 m/s ,温度为 $10.7\text{ }^{\circ}\text{C}$,相对湿度为 $38\%\sim 55\%$,均处于合理的范围内,基本满足牛只对冬季通风和保暖的需求。

4.2 模拟结果可靠性分析

对于 CFD 模拟当其归一化均方误差(NMSE)值小于 0.25 时,可以认为本次模拟的计算精度是合理的,计算如式(7)所示^[24]。

$$NMSE = \frac{(\overline{C_s} - C_m)^2}{C_{sv} C_{mv}} \quad (7)$$

式中: C_s ——模拟值;

C_m ——实测值;

C_{sv} ——模拟值的平均值;

C_{mv} ——实测值的平均值。

本次 CFD 模拟的 NMSE 值如表 2 所示。在水平高度 $H=1.2\text{ m}$ (牛正常的呼吸高度)处西侧和过道的风速、温度和相对湿度值的模拟值与实测值的对比如图 9 所示。NMSE 值均小于 0.25 ,故可以认为模拟值和实测值没有较大差异,模拟得到的结果在可接受的范围内,即可说明该 CFD 湿热环境模拟模型是合理且可行的。

表 2 CFD 模拟的 NMSE 值

Tab. 2 NMSE value of CFD simulation

变量	NMSE 值
过道风速	0.001 5
西侧风速	0.009 6
过道温度	0.025 4
西侧温度	0.013 4
过道相对湿度	0.007 4
西侧相对湿度	0.002 2

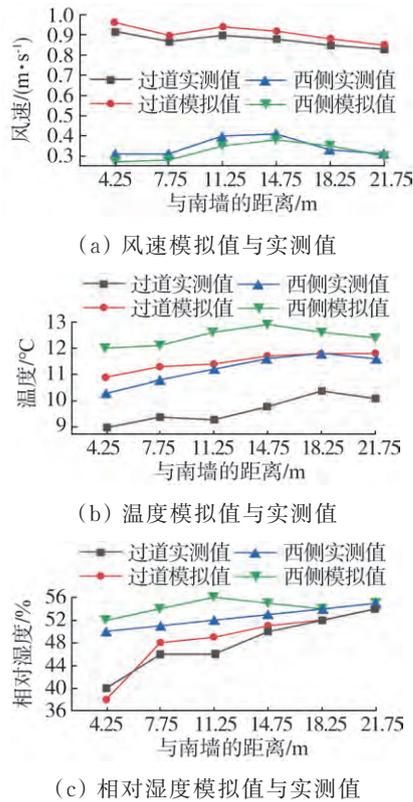


图9 风速、温度和相对湿度模拟值与实测值对比

Fig. 9 Comparison of simulated and measured wind speed, temperature and relative humidity

5 牛舍优化设计

5.1 改进方案

由于在第3节中分析了该密闭牛舍通风方案存在的缺点,如气流流速分布不均匀,气流流速在过道处较大,而在牛只活动区域气流流速较缓慢,导致空气交换速率较慢,存在的通风死区较多,湿度较大等。这些问题会降低牛舍环境质量,影响牛只生活的健康度与舒适度。所以为了牛只的福利养殖,需要对牛舍进行优化设计,改进通风方案。考虑到通风口位置对气流的影响,气流大部分集中在过道处流通未经过牛只,于是将原本位于南北墙的通风口移至东西墙,改为距地面1.25 m均匀分布的边长为1 m的4个通风口,如图10所示。建模步骤,网格划分和边界条件设置与原来保持一致。

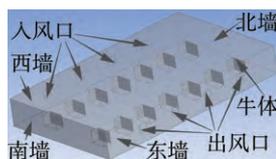


图10 改进方案计算域示意图

Fig. 10 Improved solution calculation domain diagram

5.2 优化效果分析

5.2.1 风场优化效果

经过分析处理,模拟结果选择牛舍模型在高度为

0.4 m水平面作为比较面。牛舍原始通风方式存在较多的通风死角,牛只活动区域的通风死区面积较大,通风换气不及时。由图11可知,改进通风方案后的通风情况与原始的通风情况相比,有明显的优势与提升。在靠近西墙入风口处风速较大,达到0.7~1.5 m/s,但在牛舍内其他区域,整体气流流速较为均匀,风速在0.1~0.6 m/s之间,基本没有通风死角,牛体对气流的阻碍作用明显降低,通风换气效果良好。然而改进通风方案后的牛舍虽然气流均匀,但牛只活动区域的风速较之前相比有所增加,容易造成牛只的体温流失。所以增加通风小窗可以有效提高牛舍内气体交换效率,改善空气质量,但是也会造成舍内温度的降低,要注意提高对牛只的保暖措施。

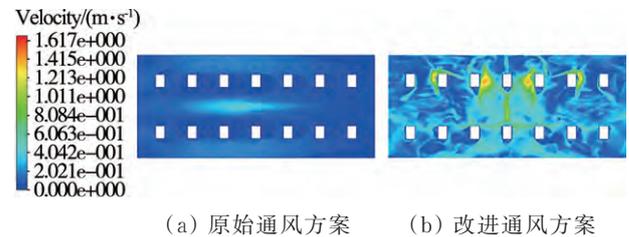


图11 改进前后牛舍风速分布云图

Fig. 11 Wind speed distribution cloud map before and after improvement of cowshed

5.2.2 温度场优化效果

在冬季对整个牛舍来说,最主要的目的就是防寒保暖,保持牛只的体温。同样选择牛舍模型在高度为0.4 m的水平面作为比较面,通过温度场云图来比较和分析两种通风方案,如图12所示。

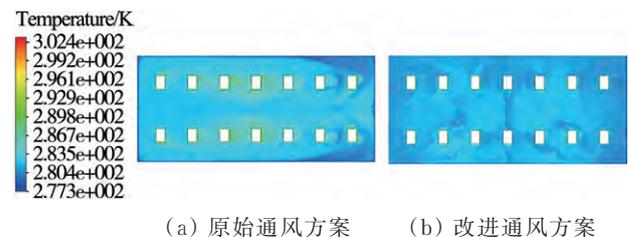


图12 改进前后牛舍温度分布云图

Fig. 12 Temperature distribution cloud map before and after improvement of cowshed

由图12可知,改进通风方案之后牛舍的整体环境温度分布均匀,只在通风口附近风速较大处的温度略低于整体温度,可以改善原始通风方案存在的局部温度过低的问题。牛舍内平均温度在10 $^{\circ}C$ 左右,整体环境较为舒适,满足牛只对冬季牛舍温度的要求。

5.2.3 相对湿度场优化效果

相对湿度场的比较也选择牛舍模型在高度为0.4 m的水平面,如图13所示,改进通风方案后牛舍内整体相对湿度保持在40%~55%,较原始通风方案来说有所降低。在靠近通风口的位置风速较大,会带

走大量水蒸气,所以相对湿度较低,在 37% 左右。总体来说,牛舍内的相对湿度分布均匀,没有相对湿度过大的通风死角,牛舍内的环境较为舒适,满足牛只对冬季牛舍的相对湿度的要求。

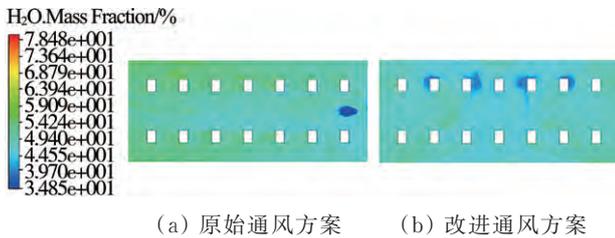


图 13 改进前后牛舍相对湿度分布云图

Fig. 13 Relative humidity distribution cloud map before and after improvement of cowshed

6 结论

1) 牛舍内的温度和相对湿度参数与风速参数相关,风速越大,温度越低,相对湿度越低。模拟结果表明:南北相对的两个通风口自然通风的通风模式,过道处风速在 0.5~1.60 m/s 之间,牛只活动区域的风速基本保持在 0~0.4 m/s 之间,大部分区域风速在 0.1 m/s 以下,舍内气流分布不均匀。牛舍内的平均温度在 10.7 °C 左右,牛只活动区域的相对湿度基本保持在 50%~60% 之间。该牛舍在冬季的空间结构较为紧密,通风情况较好,牛舍内的牛只活动区域气流流速、温度和相对湿度基本可以保证牛只在冬季对牛舍环境通风和保暖的需求。

2) CFD 模拟得到的数值与实际测量得到的数值比较接近, NMSE 值远小于 0.25, 在可以接受的范围内,说明现场实测与数值模拟有较好的吻合度。

3) 优化通风方案后牛舍内整体风速在 0.1~0.6 m/s 之间,改进通风方案牛舍模型 CFD 模拟得到的风速、温度和相对湿度在牛舍中整体分布均匀,无明显通风死角,优于原始通风方案,故该研究可为中国北方寒地房舍式牛舍环境情况评估和通风方案优化提供参考。

参 考 文 献

[1] 龙长江, 谭鹤群, 朱明, 等. 畜禽舍移动式智能监测平台研制[J]. 农业工程学报, 2021, 37(7): 68—75.
Long Changjiang, Tan Hequn, Zhu Ming, et al. Development of mobile intelligent monitoring platform for livestock and poultry house [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(7): 68—75.

[2] Burchill W, Reville F, Misselbrook T H, et al. Ammonia emissions and mitigation from a concrete yard used by cattle [J]. Biosystems Engineering, 2019, 184: 181—189.

[3] Zhou B, Wang X, Mondaca M R, et al. Assessment of

optimal airflow baffle locations and angles in mechanically-ventilated dairy houses using computational fluid dynamics [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 165: 104930.

[4] 张慢, 王湘阳, 易建明. 牛舍温热环境对奶牛生产和健康影响的研究进展[J]. 家畜生态学报, 2018, 39(2): 6—11.
Zhang Man, Wang Xiangyang, Yi Jianming. Research progress of barn microclimate on dairy cow production and health [J]. Journal of Domestic Animal Ecology, 2018, 39(2): 6—11.

[5] Pakari A, Ghani S. Comparison of different mechanical ventilation systems for dairy cow barns: CFD simulations and field measurements [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 186: 106207.

[6] 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.

[7] Tong X, Hong S, Zhao L. 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.

[8] 唐玉洁, 施正香, 邓书辉. 寒冷地区奶牛舍冬季温湿度测试与分析[J]. 现代化农业, 2019(7): 62—63.

[9] 孙妍, 陈昭辉, 安捷, 等. 北方不同类型肉牛舍冬季环境状况比较研究[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2018(24): 46—49.

[10] Cheng X, Li D, Shao L, et al. A virtual sensor simulation system of a flower greenhouse coupled with a new temperature microclimate model using three-dimensional CFD [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 181: 105934.

[11] 李昊, 钱珊珠, 曲辉. 鸡舍夏季温度和风速的神经网络仿真与分析[J]. 农村牧区机械化, 2006(2): 19—21.

[12] Tabase R K, Van Linden V, Bagci O, et al. CFD simulation of airflows and ammonia emissions in a pig compartment with underfloor air distribution system: Model validation at different ventilation rates [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 171: 105297.

[13] Coulombe F, Rousse D R, Paradis P. CFD simulations to improve air distribution inside cold climate broiler houses involving heat exchangers [J]. Biosystems Engineering, 2020, 198: 105—118.

[14] Drewry J L, Choi C Y, Powell J M, et al. Computational model of methane and ammonia emissions from dairy barns: Development and validation [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 149(S1): 80—89.

[15] Wang X, Bjerg B S, Zhang G. Design-oriented modelling on cooling performance of the earth-air heat exchanger for livestock housing [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 152: 51—58.

(下转第 81 页)

- [4] 肖宏儒, 梅松, 丁文芹, 等. 多功能茶园管理机节能高效作业技术研究[J]. 中国农机化学报, 2013, 34(6): 211—215.
Xiao Hongru, Mei Song, Ding Wenqin, et al. Research on the technology of energy-saving and efficient operation of multi-function tea farm manager [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2013, 34(6): 211—215.
- [5] 王中玉. 茶园管理机通用底盘的设计[D]. 南京: 南京农业大学, 2010.
- [6] 张延尊. 丘陵山区茶园管理机移动平台的研制[D]. 重庆: 西南大学, 2020.
- [7] 许学建. 履带式高地隙茶园管理机底盘行驶系统设计[D]. 镇江: 江苏大学, 2016.
- [8] 徐良, 周训谦, 肖洁. 3ZFC-40 型茶园中耕机的研制[J]. 农产品加工, 2015(11): 52—54, 58.
- [9] 秦宽, 梁小龙, 曹成茂, 等. 茶园节能型开沟刀设计与试验[J]. 浙江农业学报, 2021, 33(7): 1320—1328.
- [10] 韩余, 肖宏儒, 宋志禹, 等. 我国茶园机械化作业模式研究[J]. 中国农业科技导报, 2016, 18(3): 74—81.
Han Yu, Xiao Hongru, Song Zhiyu, et al. Research on mechanization technology mode of tea plantation and management [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2016, 18(3): 74—81.
- [11] 张海鹏, 林聪, 陈凌霄, 等. 茶园开沟施肥覆土一体机的设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2022, 43(3): 28—35.
Zhang Haipeng, Lin Cong, Chen Lingxiao, et al. Design and analysis of an integrated machine for trenching, fertilizing and mulching in tea plantations [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43 (3) : 28—35.
- [12] 张欣悦, 李连豪, 汪春, 等. 1GSZ-350 型灭茬旋耕联合整地机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2009, 25(5): 73—77.
Zhang Xinyue, Li Lianhao, Wang Chun, et al. Design and test of 1GSZ-350 stubble-breaking and rotary tilling combined cultivating machine [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25 (5): 73—77.
- [13] 贺小伟. 高茬秸秆旋耕翻埋功耗检测系统设计与试验研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2014.
- [14] 李宝筏. 农业机械学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003.
- [15] 袁秀文. 农业机械设计手册[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007.
- [16] 陈雪, 张周, 黄化刚, 等. 基于 ADAMS 旋耕刀工作参数优化及 ANSYS 仿真分析[J]. 现代农业科技, 2018(2): 167—170.
- [17] 朱留宪. 基于 SPH 算法的微耕机旋耕刀有限元仿真与优化[D]. 重庆: 西南大学, 2012.
- [18] 丁为民, 王耀华, 彭嵩植. 正、反转旋耕刀性能分析及切土扭矩比较试验[J]. 南京农业大学学报, 2001(1): 113—117.
Ding Weimin, Wang Yaohua, Peng Songzhi. Comparison experiment and property analysis of up-cut and down-cut rotary blades [J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2001(1): 113—117.
- (上接第 75 页)
- [16] 邓书辉, 施正香, 李保明, 等. 低屋面横向通风牛舍空气流场 CFD 模拟[J]. 农业工程学报, 2014, 30(6): 139—146.
Deng Shuhui, Shi Zhengxiang, Li Baoming, et al. CFD simulation of airflow distribution in low profile cross ventilated dairy cattle barn [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30 (6): 139—146.
- [17] Bovo M, Santolini E, Barbaresi A, et al. Assessment of geometrical and seasonal effects on the natural ventilation of a pig barn using CFD simulations [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 193: 106652.
- [18] Babadi K A, Khorasanizadeh H, Aghaei A. CFD modeling of air flow, humidity, CO₂ and NH₃ distributions in a caged laying hen house with tunnel ventilation system [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 193: 106677.
- [19] 孙乐乐. 严寒地区奶牛舍垂直式通风系统冬季调控方案研究[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2021.
- [20] 马亚沛. 大型养猪场通风系统优化设计与数值模拟研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2017.
- [21] 陈文娟, 董润坚, 周海柱, 等. 北方民用猪舍自然通风的数值模拟[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(13): 6673—6676.
Chen Wenjuan, Dong Runjian, Zhou Haizhu, et al. Numerical simulation of natural ventilation in northern civil pig house [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2010, 38(13): 6673—6676.
- [22] 李开泰. 基于 CFD 的猪舍内外环境空气质量模拟研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- [23] 汪开英, 李开泰, 李玉林娟, 等. 保育舍冬季湿热环境与颗粒物 CFD 模拟研究[J]. 农业机械学报, 2017, 48(9): 270—278.
Wang Kaiying, Li Kaitai, Li Wanglinjuan, et al. CFD simulation of indoor hygrothermal environment and particle matter of weaned pig building [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 270—278.
- [24] 赵婉莹, 张琦, 施正香. 复合保温卷帘改善寒区开放式牛舍冬季热湿环境[J]. 农业工程学报, 2018, 34(21): 215—221.
Zhao Wanying, Zhang Qi, Shi Zhengxiang. Complex insulation shutter improving winter thermal and humidity environment of open-ended cowshed in cold region [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(21): 215—221.