



姜宇晨, 严格齐, 王晓鹃, 赵景鹏, 刘敏, 焦洪超, 林海. 基于CFD的叠层笼养肉鸭舍多孔介质模型简化及生长阶段阻力系数[J]. 中国农业大学学报, 2026, 31(03): 170-180.

JIANG Yuchen, YAN Geqi, WANG Xiaojuan, ZHAO Jingpeng, LIU Min, JIAO Hongchao, LIN Hai. CFD-based modeling of porous media simplification and growth-stage-dependent resistance coefficients in tiered-cage meat duck houses[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2026, 31(03): 170-180.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2026.03.15

基于CFD的叠层笼养肉鸭舍多孔介质模型简化 及生长阶段阻力系数

姜宇晨 严格齐* 王晓鹃 赵景鹏 刘敏 焦洪超 林海

(山东农业大学 动物科技学院/非粮饲料资源高效利用重点实验室(部省共建)/

山东省畜禽营养与高效饲养重点实验室, 山东 泰安 271017)

摘要 针对叠层笼养肉鸭舍在不同生长阶段通风优化的工程需求, 采用计算流体力学方法建立精细模型、无头模型、躯干模型、椭球模型4种简化肉鸭舍几何模型, 系统分析不同日龄肉鸭模型在鸭笼长(X)、宽(Y)、高(Z)3个方向上的阻力系数差异与变化趋势, 并对鸭群活动区域阻力特性的动态变化规律进行研究。结果表明: 1) 肉鸭模型简化程度对阻力系数有显著影响, 其中精细模型与无头模型间惯性阻力误差最小, X 、 Y 、 Z 方向分别为-15.7%、-13.1%和7.1%, 而另2种模型误差较大, 最大达到-44.4%; 2) 鸭只生长过程中, 随着体重从0.19 kg增大至2.82 kg, X 、 Y 、 Z 方向惯性黏性阻力系数均显著增加, 其中 Z 方向增幅最为明显。本研究确定的肉鸭不同生长阶段的阻力系数及模型简化方法, 可为叠层笼养肉鸭舍的CFD通风模拟提供关键参数支持。

关键词 肉鸭; 叠层笼养; 计算流体力学; 多孔介质模型; 阻力系数; 生长阶段

中图分类号 S26; S817.3

文章编号 1007-4333(2026)03-0170-11

文献标志码 A

CFD-based modeling of porous media simplification and growth-stage-dependent resistance coefficients in tiered-cage meat duck houses

JIANG Yuchen, YAN Geqi, WANG Xiaojuan, ZHAO Jingpeng, LIU Min,
JIAO Hongchao, LIN Hai

(College of Animal Science and Technology/Key Laboratory of Efficient Utilization of Non-Grain Feed Resources (Ministry-Province Co-constructed)/Shandong Provincial Key Laboratory of Livestock and Poultry Nutrition and Efficient Feeding, Shandong Agricultural University, Tai'an 271017, China)

Abstract To address the engineering requirements for ventilation optimization in tiered-cage meat duck houses at different growth stages, computational fluid dynamics (CFD) was employed to establish four simplified duck geometric models: One detailed model, one head-removed model, one torso model, and one ellipsoid model. Systematic analysis was conducted to examine the differences and trends in resistance coefficients along the length (X), width (Y), and height (Z) directions of the duck cage for duck models at different ages. Additionally, the dynamic variations in the resistance characteristics of the duck activity area were investigated. The results indicate that: 1) The level of simplification of the duck model has a significant impact on the resistance

收稿日期: 2025-04-15; 接受日期: 2025-10-24

基金项目: 山东省重点研发计划(2022TZX0037), (2021CXGC010805)

第一作者: 姜宇晨(ORCID: 0009-0004-2873-6244), 硕士研究生, E-mail: jiangyc9907@163.com

通讯作者: 严格齐(ORCID: 0000-0002-5766-8576), 博士, 副教授, 主要从事智慧畜牧工程研究, E-mail: yangeqi@sdau.edu.cn

coefficients. The inertial resistance error between the detailed model and the headless model was the smallest, with deviations of -15.7% , -13.1% , and 7.1% in the X , Y , and Z directions, respectively, while the errors for the other two models were larger, reaching a maximum of -44.4% . 2) During the growth process of the ducks, as their body weight increased from 0.19 to 2.82 kg, the inertial and viscous resistance coefficients in the X , Y , and Z directions significantly increased, and the increase was the most pronounced in the Z direction. In conclusion, the resistance coefficients for ducks at different growth stages and the model simplification methods proposed in this study can provide key parameter support for CFD ventilation simulations in tiered-cage meat duck houses.

Keywords meat duck; tiered-cage raising; computational fluid dynamics; porous medium model; resistance coefficient; growth stage

肉鸭层叠式笼养模式借鉴肉鸡笼养技术,能显著提高土地利用率和养殖效率,近年来迅速推广并得到广泛应用。然而,由于设备排布密集、饲养密度大,其对舍内环境调控提出了更高要求^[1-3]。若通风系统设计不当,可能导致舍内温湿度分布不均、有害气体浓度升高,影响动物福利与生产性能,因此优化舍内环境至关重要^[4-6]。计算流体力学(Computational fluid dynamics, CFD)因其能够精确模拟多种环境参数场,并相较于现场试验具有更高的灵活性、可重复性和成本效益,已成为评估和优化畜禽舍环境的重要工具^[7-9]。然而,以往CFD研究常将笼层区域处理为固体区域,忽略了笼内通风^[10-11],无法准确模拟笼内环境;而对每只动物精细建模则会大幅增加计算资源需求与时间成本^[12]。

为解决上述问题,已有研究常采用多孔介质模型简化动物活动区域(Animal occupied zone, AOZ),以平衡计算精度与效率^[13-15]。Doubbia等^[16]研究表明,多孔介质模型能够节省高达 90% 计算时间,可用于奶牛舍模拟。应用多孔介质模型的关键在于获取AOZ的阻力系数,通常通过CFD模拟不同进风速度下的压降快速估算^[17]。在动物几何建模方面,已有研究表明,适当简化个体模型可在保证精度的同时减少计算量^[18-19]。Li等^[20]利用CFD方法研究了鸡的对流换热系数,发现采用球体模型或简化鸡模型的结果与实验值吻合良好;Cheng等^[21]和Xin等^[22]分别探讨了几何形状与体重对蛋鸡和猪阻力系数的影响,为多孔介质模型的应用提供了参考。然而,肉鸭生长速度快(35日龄可达 3 kg以上),与成年蛋鸡(质量约 $1.5\sim 2.0$ kg)体型特征上存在较大差异,加之肉鸭养殖的笼具尺寸更紧凑、饲养密度更高等布局特点,导致肉鸭舍内气流模式与蛋鸡舍迥异。因此,肉鸭舍实现精准通风,

亟需掌握肉鸭阻力系数随其不同生长阶段的动态变化规律,不能直接套用现有基于蛋鸡模型的参数。目前,国内外尚未见关于肉鸭AOZ阻力系数的相关报道。

本研究拟采用CFD数值模拟方法,建立肉鸭精细模型、无头模型、躯干模型及椭球模型4种几何简化形式,系统分析不同简化程度及鸭只日龄对肉鸭群体气流阻力特性的影响,获取各阶段AOZ惯性阻力系数与黏性阻力系数,以期叠层笼养肉鸭舍通风系统的CFD模拟与环控优化提供关键参数及模型简化依据,提升模型的精确性与计算效率。

1 材料与方法

1.1 虚拟风洞的构建及验证

为验证CFD模拟方法的可靠性,本研究参考Cheng等^[21]基于蛋鸡的风洞试验实测数据,建立与之对应的虚拟风洞模型进行数值验证,该研究中蛋鸡活动区域的气流组织特征与本研究所关注的肉鸭AOZ气流模式具有相似性,具有较高的参考价值。本研究参照该蛋鸡阻力试验的几何构型与边界条件设置构建了长 $6\,910$ mm、宽 500 mm、高 500 mm的虚拟风洞计算域,并在长 500 mm的鸡笼区域内布置了5个直径 150 mm的球体以模拟体重约 1.5 kg的母鸡。随后在虚拟风洞中模拟测量笼区内5条垂直测量线($L1, L2, \dots, L5$)上的风速值,以进行后续对比分析。虚拟风洞计算域及 $L1, L2, \dots, L5$ 风速测量线位置见图1。

为便于定量分析,以笼区左下角为原点 O ,笼长、宽和高度方向为 X 、 Y 和 Z 轴,建立空间坐标系,本研究中CFD模拟,包括验证所用的蛋鸡模型与不同日龄及简化类型的肉鸭模型,其阻力在 X 、 Y 、 Z 方向的分量均基于此坐标系进行定义与计算。

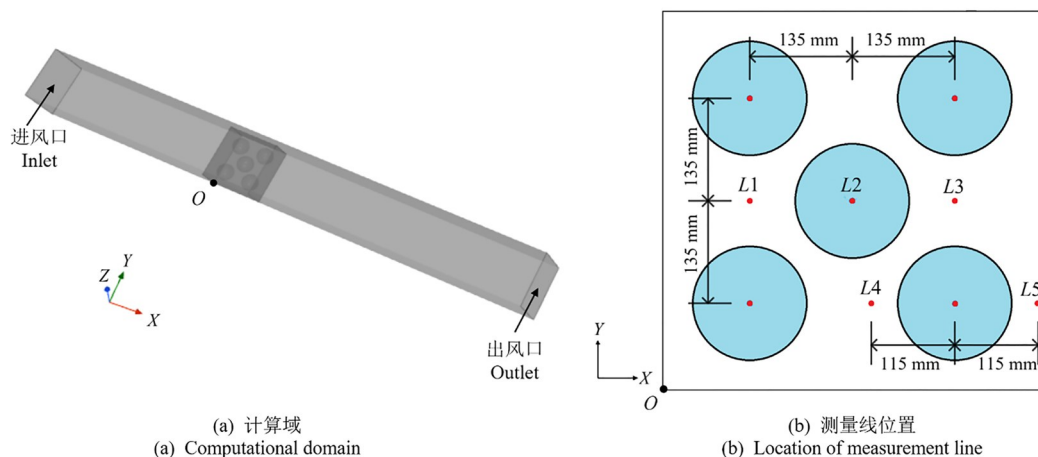


图1 虚拟风洞计算域及风速测量线位置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of virtual wind tunnel computational domain and wind speed measurement line location

虚拟风洞进风口设置为速度入口,风速取1.58 m/s,湍流强度8%,出口处为零静压压力出口,风洞表面和5个球体表面均采用无滑移壁面边界条件。使用标准 $k-\epsilon$ 湍流模型和高 y^+ 壁面处理函数,采用非结构化四面体网格对计算域进行网格划分,保证 y^+ 值小于1,以计算球体附近气流层流动^[23]。选择3种数量的网格对验证模型进行网格独立性检验,细网格数量为2 135 383,中网格数量1 347 303,粗网格数量795 838,模拟所得压降依次为0.654、0.646和0.586 Pa。由于细网格与中网格设定下压降误差仅为1.2%,因此选择中网格下的模型进行模拟验证。将本研究得到的CFD风速模拟值与Cheng等^[21]实测值进行对比,计算得到平均相对误差(Mean relative error, MRE),用于验证本研究模拟方法的有效性。MRE计算公式如下:

$$MRE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{x_i - y_i}{y_i} \right| \times 100\% \quad (1)$$

式中: x_i 为第*i*个测点的速度模拟值,m/s; y_i 为第*i*个测点的速度实测值,m/s; n 为测点数。

1.2 鸭只模型的简化

1.2.1 不同体重的鸭只模型

本研究以山东省新泰市某叠层笼养肉鸭场的养殖规模、饲养方式及鸭笼结构作为参照。肉鸭品种为樱桃谷鸭,根据该鸭场实际生产情况统计获取了7、14、21、28、35日龄时鸭只平均体重,分别为0.19、0.64、1.35、2.08、2.82 kg。7日龄雏鸭与

14日龄后鸭只体型差别较大,故分别建立7日龄雏鸭及35日龄鸭只的简化模型(图2);其余日龄鸭只模型与35日龄模型形状相同,根据不同体重对应的体积等比例缩小。

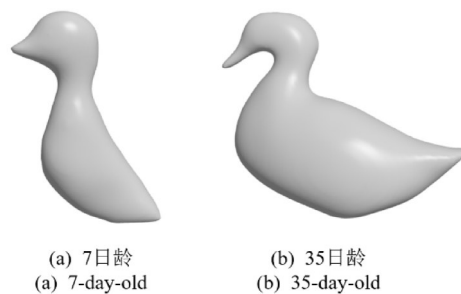


图2 7日龄和35日龄鸭只简化模型

Fig. 2 Simplified model of 7-day-old and 35-day-old ducklings

1.2.2 不同简化方式的鸭只模型

模型简化可降低网格划分难度,提升网格质量,减少计算时间^[24]。本研究对35日龄体重约2.82 kg的鸭只模型进行了不同程度的简化,4种简化模型体积一致,笼内鸭只空间布局、位置及数量完全相同,仅模型存在区别,模型及其尺寸见图3和表1。鸭精细模型保留了鸭只的基本结构,由于鸭腿、脚蹼等部位对气流阻力的影响小,但结构复杂,故忽略;鸭无头模型在精细模型基础上省略了体积较小,但会生成大量网格的头部;鸭躯干模型在无

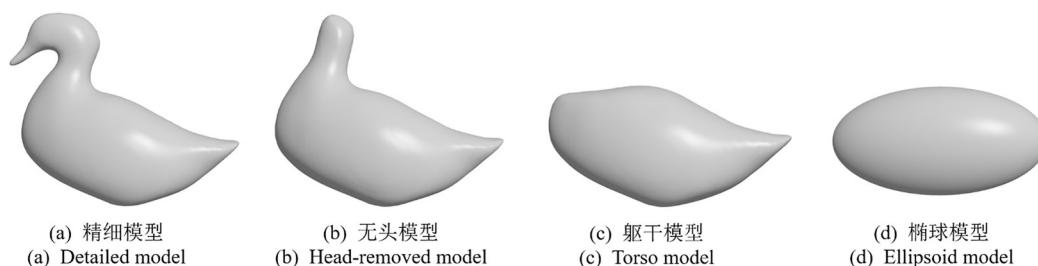


图3 鸭只4种简化模型

Fig. 3 Four simplified duck models

表1 鸭只4种简化模型的尺寸

Table 1 Dimensions of four simplified duck models

mm

参数 Parameter	精细模型 Detailed model	无头模型 Head-removed model	躯干模型 Torso model	椭球模型 Ellipsoid model
体长 Body length	405	410	430	430
胸宽 Chest width	172	174	183	183
躯干高度 Body height	235	238	248	210

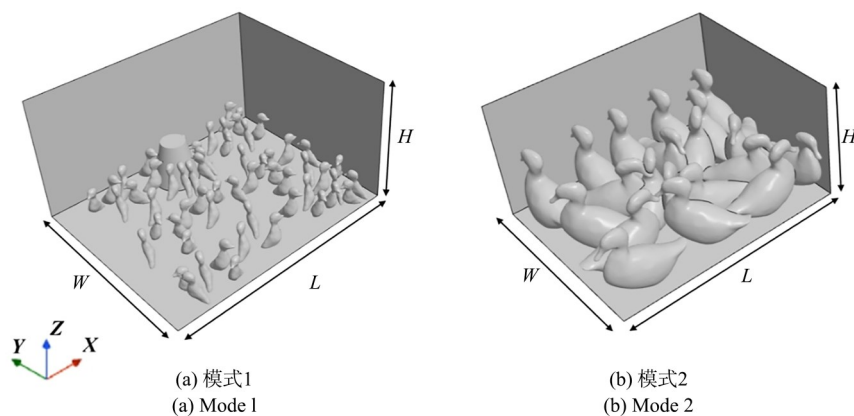
头模型基础上优化了体积较小的脖子部位,保留了身体躯干的主要形态;鸭椭球模型为保持体积一致,与鸭躯干模型长宽相同,高度减少,表面更为光滑。

1.3 AOZ阻力系数的CFD模拟

1.3.1 鸭只在笼内的分布

试验鸭场单个鸭笼长 $L=1\ 350\text{ mm}$,宽 $W=1\ 100\text{ mm}$,高 $H=720\text{ mm}$ 。1~7日龄期间,每个鸭笼内饲养60只雏鸭,饲养密度约 $40\text{ 只}/\text{m}^2$;自8日龄起直至出栏期间,每个鸭笼内饲养20只肉鸭,自动投料

机在鸭笼其中一侧投放饲料,饲养密度约 $13\text{ 只}/\text{m}^2$ 。鸭只分布情况参考鸭舍内不同时间拍摄的照片进行设计,根据不同生长阶段笼内的鸭只数量,设计2种鸭只分布模式(图4)。其中,7日龄雏鸭阶段采用模式1,笼内放置1个圆形料桶,料桶底盘直径280 mm,桶顶直径150 mm,高225 mm,约10只鸭围绕料桶分布,其他鸭只笼内其他区域随机分布,离地高度20 mm。14日龄至35日龄阶段采用模式2,有6只鸭正对料槽一侧,其他鸭只朝向与位置随机分布,离地高度根据日龄增加分别为30、40、50、60 mm。



L 为鸭笼长; W 为鸭笼宽; H 为鸭笼高。图5同。

L for length, W for width, and H for height of the duck cage. Same as in Fig. 5.

图4 2种模式下鸭只在笼内的分布

Fig. 4 Distribution of ducks in cages under two modes

1.3.2 虚拟风洞计算域的设计

鸭笼区域 X 、 Y 和 Z 3个方向上的阻力系数的计算域见图5。进风口设置为速度入口,风速取0.1、0.3、0.5、1.0、1.5、2.0和2.5 m/s,出风口设

置为压力出口,鸭只表面、笼内料槽设置为无滑移壁面,风洞外表面设置为对称边界,网格尺寸与1.1中虚拟风洞模型验证时采用的中网格尺寸一致。

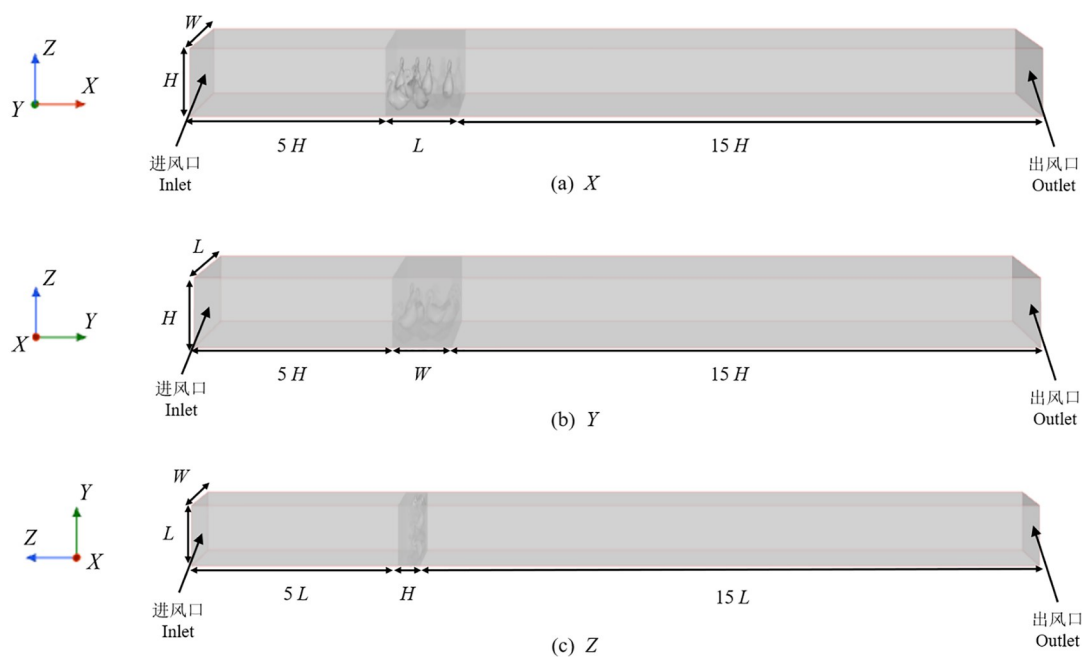


图5 鸭笼区域 X 、 Y 、 Z 方向上的阻力系数计算域

Fig. 5 Computational domain for the drag coefficient of the duck cage area in the X , Y , and Z directions

1.3.3 网格划分及阻力系数计算

基于CFD验证模拟中网格划分情况,使用STAR-CCM+(ver2302 18.02.008, German)中内置的网格划分模块对计算域进行网格划分,采用非结构化四面体网格。使用标准 k - ϵ 湍流模型和高 y^+ 壁面处理函数进行求解。

在CFD中,多孔介质的阻力通常通过动量方程中的阻力项来建模。常用公式结合了黏性阻力(达西项)和惯性阻力(Forchheimer修正项):

$$\Delta p = \frac{\mu}{K} \Delta L v + \frac{C}{2} \rho \Delta L v^2 \quad (2)$$

式中: Δp 为压降,Pa; K 为渗透率, m^2 ; $1/K$ 为黏性阻力系数, $1/m^2$; C 为惯性阻力系数, $1/m$; μ 为空气动力黏度,Pa/s; v 为风速,m/s; ρ 为空气密度, kg/m^3 ; ΔL 为多孔介质区域厚度,m。

将风速与模拟所得的进出口压降拟合合成常数项为0的一元二次方程,其二次项与一次项系数通过式(2)求解得到,即为惯性阻力系数和黏性阻力系数。

2 结果与分析

2.1 CFD模拟方法验证

图6示出虚拟风洞模拟风速与Cheng等^[21]实测值的对比。大多数测点的模拟风速都处于实测点风速波动范围之内,且接近实测点的风速平均值;在 $L4$ 与 $L5$ 上有部分模拟值与实测值相差较大,是由于 $L4$ 与 $L5$ 位于回流区域, k - ϵ 模型基于各向同性湍流假设,然而在回流区域湍流通常呈现明显的各向异性,导致该模型无法准确捕捉能量传递和耗散的复杂机制^[25]。所有测点平均误差为6.18%,Cheng等^[21]采用相同湍流模型所得误差为8.10%。综上,本研究模拟方法合理,可用于鸭笼区域气流阻力模拟计算中。

2.2 鸭只模型简化程度对鸭笼区域气流阻力的影响

2.2.1 鸭只模型简化程度对单位长度压降的影响

图7为鸭只精细模型、无头模型、躯干模型和椭球模型在虚拟风洞计算域内 X 、 Y 和 Z 方向上速度

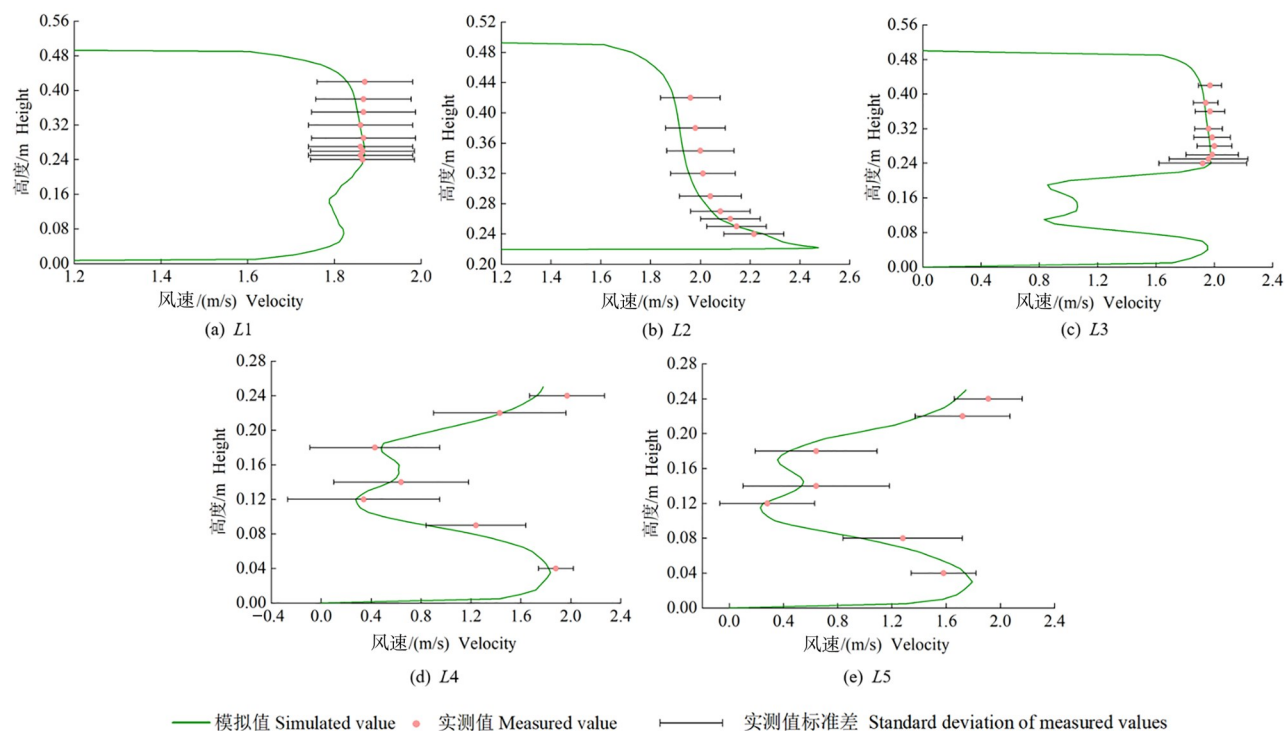


图6 测量线模拟风速与实测风速的对比

Fig. 6 Comparison between simulated and measured wind speeds at measurement lines

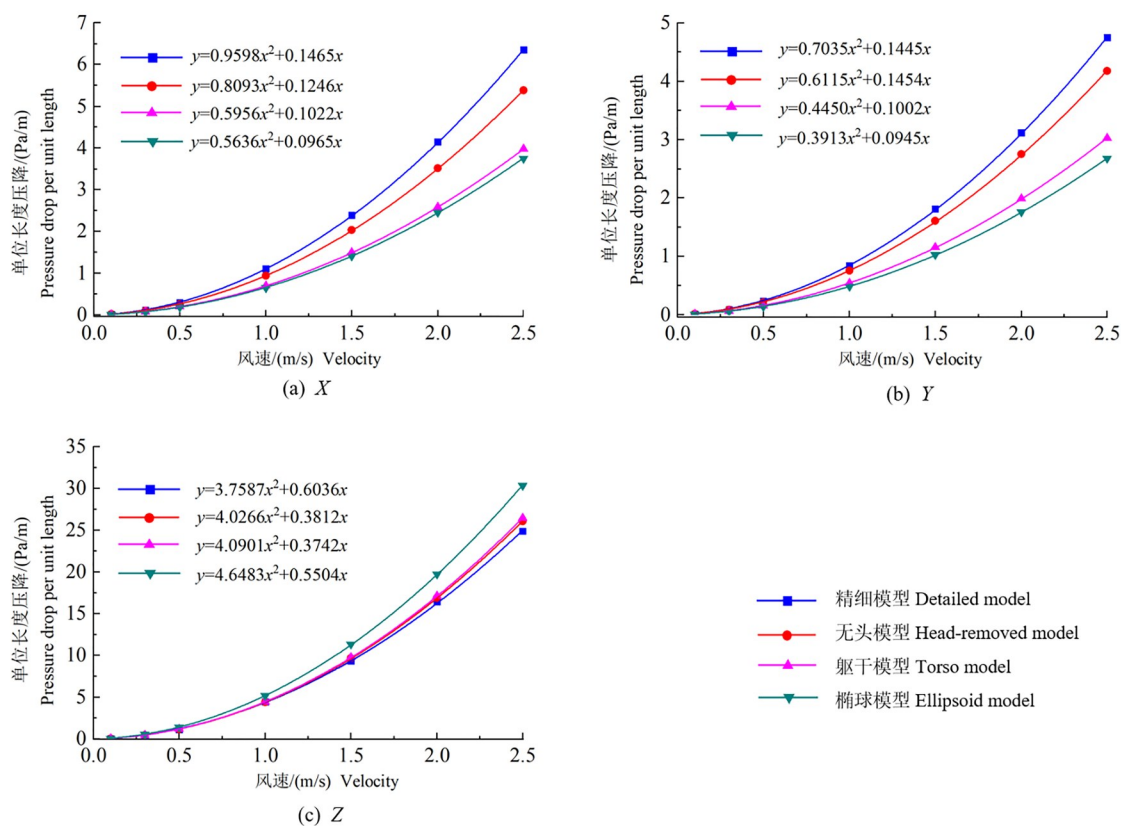


图7 4种鸭只简化模型在X、Y和Z方向上风速与压降的拟合曲线

Fig. 7 Fitted formulas of wind speed and pressure drop for four simplified duck models in the X, Y, and Z directions

与单位长度压降之间的回归关系。可以看出,单位长度的压降随速度的增加而增大,并且在同一方向上,速度越大,4种模型的单位长度压降相差越大。以精细模型作为参考模型,精细模型与无头模型之间的相对误差在X方向上为-15.3%~-11.2%,Y方向为-12.1%~-9.4%,Z方向为0.6%~4.8%。精细模型与躯干模型之间的相对误差在X方向上为-37.6%~-29.2%,Y方向为-36.3%~-28.9%,Z方向为0.7%~6.3%。精细模型与椭球模型之间的相对误差在X方向上为-34.2%~-40.9%,Y方向为-33.1%~-43.6%,Z方向为16.8%~25.3%。整体看,精细模型与无头模型间单位长度压降在X、Y、Z3个方向上相对误差最小,与椭球模型之间的相对误差最大,这可能是由于在X、Y方向上,躯干模型以及椭球模型相较其他2种模型没有了脖子以上区域,躯干区域体积略微变大,但在X、Y方向整体投影面积减小,而椭球模型表面相较躯干模型更加光滑,故其压降最小;而在Z方向,由于4种模型体积一致,椭球模型相较其他3种模型在Z方向上的投影面积最大,导

致单位长度压降也随其投影面积而增大。

2.2.2 鸭只模型简化程度对阻力系数的影响

4种模型在不同方向上的惯性阻力系数与黏性阻力系数见表2。以精细模型作为参考模型,精细模型与无头模型之间惯性阻力的相对误差在X、Y、Z方向上分别为-15.7%、-13.1%、7.1%,黏性阻力的相对误差在X、Y、Z方向上分别为-14.9%、0.6%、-36.8%。精细模型与躯干模型之间惯性阻力的相对误差在X、Y、Z方向上分别为-37.9%、-36.7%、8.8%,黏性阻力的相对误差在X、Y、Z方向上分别为-30.2%、-30.7%、-38.0%。精细模型与椭球模型之间惯性阻力的相对误差在X、Y、Z方向上分别为-41.3%、-44.4%、23.7%,黏性阻力的相对误差在X、Y、Z方向上分别为-34.1%、-34.6%、-8.8%。惯性阻力系数的误差与2.2.1中单位长度压降趋势一致,但黏性阻力系数值无明显规律(表2);将风速值代入式(2)计算可知,一次项(黏性阻力系数)对单位长度压降的贡献远小于二次项(惯性阻力系数),故主要对惯性阻力系数进行分析。

表2 4种简化鸭只模型在X、Y和Z方向上的惯性阻力系数(C)和黏性阻力系数(1/K)

Table 2 Inertial resistance coefficients(C) and viscous resistance coefficients(1/K) in the X, Y, and Z directions for four simplified duck models

模型 Model	X		Y		Z	
	C/m ⁻¹	(1/K)/m ⁻²	C/m ⁻¹	(1/K)/m ⁻²	C/m ⁻¹	(1/K)/m ⁻²
精细模型 Detailed model	1.160 8	6 078.11	1.044 2	7 357.66	8.523 1	46 954.93
无头模型 Head-removed model	0.978 7	5 169.50	0.907 6	7 403.48	9.130 6	29 654.11
躯干模型 Torso model	0.720 3	4 240.15	0.660 5	5 101.99	9.274 6	29 109.57
椭球模型 Ellipsoid model	0.681 6	4 003.67	0.580 8	4 811.38	10.540 4	42 816.42

精细模型与无头模型阻力系数在3个方向上的相对误差较小,2种模型最为相近,但躯干模型和椭球模型与精细模型误差较大,为了降低建模的难度,可以使用无头模型代替精细模型对阻力系数进行求解。在Cheng等^[21]的研究中,通过分析蛋鸡3种模型的静压降,得出其身体模型和椭球模型不能代替蛋鸡模型的结论,可能是因为该研究采用的2种简化模型均省略了鸡脖子以上的部分,对气流

的影响较大,而本研究的无头模型保留了鸭脖区域,优化了构造较为复杂的头部后与精细模型的差异较小。此外,Xin等^[22]在躺卧猪模型对阻力系数的影响研究中认为可以使用椭球模型代替简化猪模型,但鸭只模型与猪模型差距较大,且相较椭球模型更为复杂。故本研究认为在对与鸡、鹅等与鸭体型和行为特征相似的家禽多孔介质模型应用研究中,若想要减少计算量,可以将形状复杂的头部

进行优化以减少网格的生成。

2.2.3 鸭只模型简化程度对气流分布的影响

为系统分析不同简化模型对气流场的影响,选取2个截面进行对比。截面1为 $Z=270\text{ mm}$ 的水平面,该高度近似模拟鸭只站立时的高度,能反映活

动区内的气流环境;截面2为 $X=5\ 400\text{ mm}$ 的垂直面,位于鸭群活动区域(AOZ)的后方,用于观察气流穿过鸭群后的情况。气流穿过4种鸭只简化模型AOZ区域后在上述2个截面上的风速分布情况见图8。

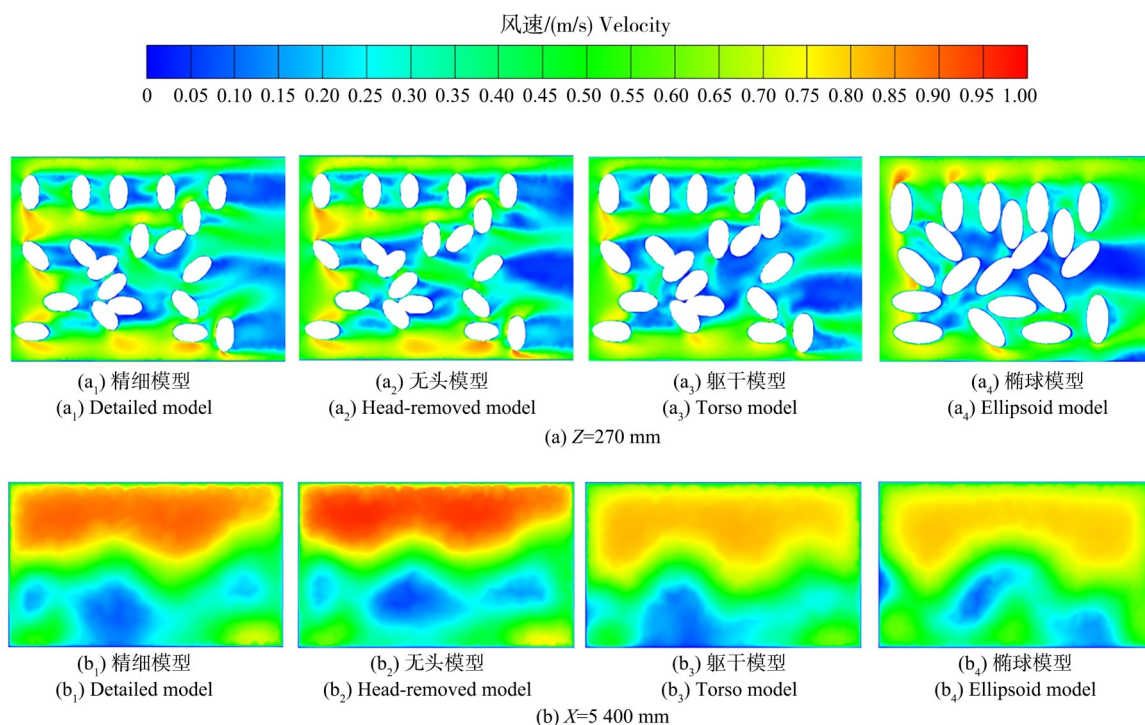


图8 4种鸭只简化模型在 $Z=270\text{ mm}$ 和 $X=5\ 400\text{ mm}$ 平面上的风速分布云图

Fig. 8 Wind speed distribution contour maps of four simplified duck models on the plane of $Z=270\text{ mm}$ and $X=5\ 400\text{ mm}$

不同程度鸭只简化模型显著影响了流经AOZ后的气流分布,鸭精细模型、无头模型、躯干模型和椭球模型在 $Z=270\text{ mm}$ 平面上的最大风速分别为 0.82 、 0.86 、 0.74 和 0.73 m/s ,在 $X=5\ 400\text{ mm}$ 平面上最大风速分别为 0.96 、 0.91 、 0.85 和 0.95 m/s 。躯干模型及椭球模型对风速分布影响较为明显,这可能是因为这2种模型相比精细及无头模型,省略脖子以上区域,对气流的阻挡消失,使气流场产生变化。在体积相等的情况下,椭球模型因其光滑、连续的表面形态,在相同的投影平面上占据了更大的投影面积,从而在 Z 方向截面上呈现出覆盖区域更广、视觉体积更大的效果。结合2.2.2中不同简化模型的阻力系数对比结果,无头模型在保证精度和计算效率之间取得了最佳平衡,是用于肉鸭AOZ阻力系数模拟的推荐简化模型。躯干模型和椭球模型误差过大,不推荐用于精确模拟。

2.3 不同日龄鸭只对鸭笼区域气流阻力的影响

7日龄与14日龄肉鸭的个体质量差异显著,但因饲养密度调整,每个鸭群活动区域(AOZ)内鸭只的总体积相近,最终导致其阻力系数较为接近(表3)。在同一风速下,日龄越大的鸭群导致的单位长度压降越高,这表明鸭只体积的增长是AOZ阻力增大的主要因素(图9)。在鸭笼高度方向(Z 方向)风速相同时单位长度压降随日龄变化的差距最大,这与肉鸭的生长形态密切相关:随着日龄增长,肉鸭体型在 Z 方向的投影面积显著增大,导致其垂直气流路径受阻最为严重,单位长度压降明显增大。

鸭只在生长过程中体积增大,站立高度和躯干宽度均增大,站立高度的增大导致 X 和 Y 方向上阻力系数增大,而躯干宽度主导了 Z 方向上阻力系数的变化。选取28日龄约 2.08 kg 的肉鸭与

表3 不同日龄鸭只在X,Y和Z方向上的惯性阻力系数(C)和黏性阻力系数(1/K)

Table 3 The inertial resistance coefficient (C) and viscous resistance coefficient (1/K) of ducks at different day-old in the X, Y, and Z directions.

日龄 Day-old	X		Y		Z	
	C /m ⁻¹	(1/K)/m ⁻²	C /m ⁻¹	(1/K)/m ⁻²	C /m ⁻¹	(1/K)/m ⁻²
7日龄 7-day-old	0.352 1	3 292.96	0.374 2	4 130.47	0.500 2	6 656.62
14日龄 14-day-old	0.357 7	4 153.03	0.328 9	3 503.67	0.979 6	6 028.06
21日龄 21-day-old	0.480 2	4 970.36	0.527 2	4 450.75	2.152 2	6 914.11
28日龄 28-day-old	0.795 5	5 277.37	0.750 9	6 028.70	4.421 8	11 645.38
35日龄 35-day-old	1.160 8	6 078.11	1.044 2	7 357.66	8.523 1	46 954.93

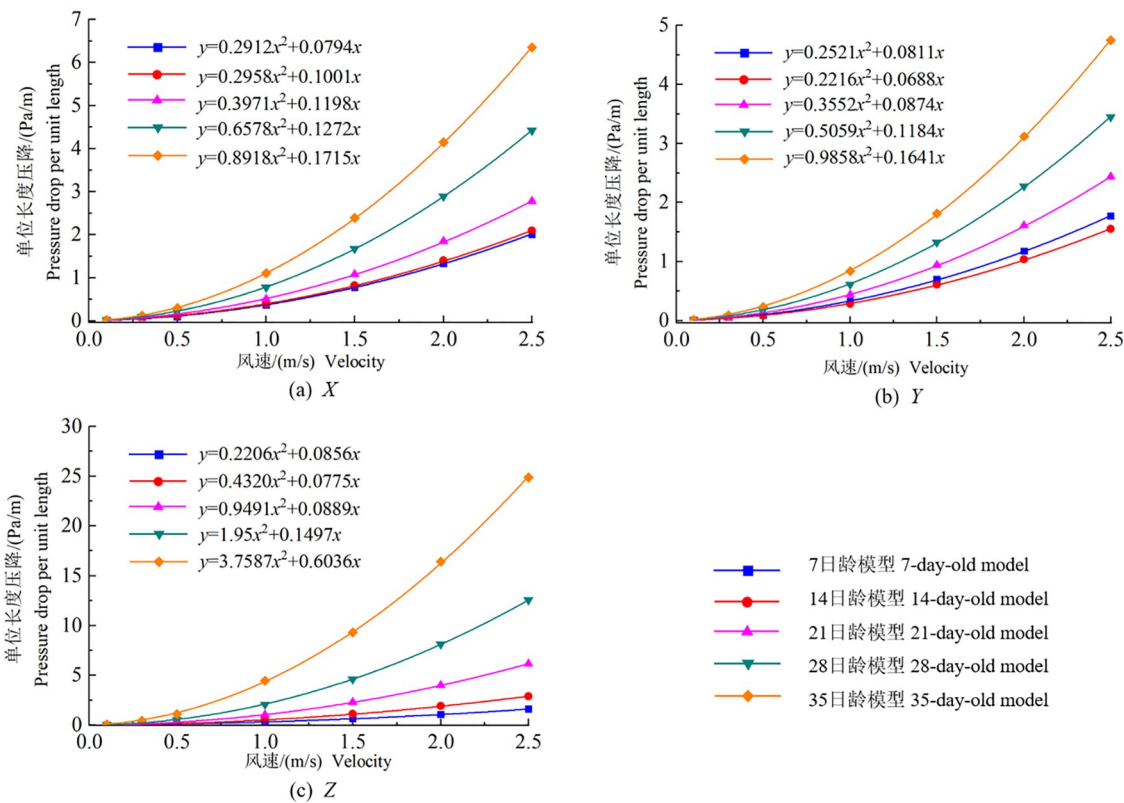


图9 不同日龄鸭只在X、Y、Z方向上风速与压降的拟合曲线

Fig. 9 Fitted formulas of wind speed and pressure drop for ducks of different days of age in the X, Y, and Z directions

Cheng等^[21]研究中2.0 kg的蛋鸡进行比较,本研究X、Y、Z方向的惯性阻力系数分别为0.80、0.75、4.42 m⁻¹,Cheng等研究中X、Y、Z方向的惯性阻力系数分别为0.82、2.27、3.23 m⁻¹。在X方向上,二者惯性阻力系数相近;然而在Y方向上,肉鸭阻力系数显著低于蛋鸡,表明鸭舍横向气流穿透性更优;而在Z方向上,肉鸭阻力系数则高于蛋鸡约37%,说明垂直气流在鸭笼区域更易受阻,这些差异主要源于肉鸭与蛋鸡在笼具设计及体型特征上的显著不同。本研究模拟所用的叠层鸭笼为适应

肉鸭快速生长,其笼层高度高于蛋鸡笼,导致在X和Y方向上具有更大的有效通风孔隙和更小的气流阻力;同时肉鸭体型相较蛋鸡更为扁平,且随着日龄增长鸭只分布的叠加效应使Z方向投影面积显著增大,进而导致垂直气流阻力增大。因此,本研究通过精细建模所获得的阻力系数,充分反映了肉鸭的生长形态特征和舍内的笼具结构,结果具有合理性。

本研究所确定的肉鸭不同生长阶段的阻力系数及模型简化方法是基于叠层笼养模式下的特定

鸭只分布,结论主要适用于与本试验条件相近的中高密度叠层笼养禽舍环境。在不同家禽品种、平养条件或叠层笼养不同笼具密度、布局下,个体间的遮挡效应和整体AOZ的阻力特性可能发生变化,此时需重新评估相关参数。

3 结 论

本研究采用CFD数值模拟方法,系统分析了叠层笼养模式下肉鸭活动区域(Animal-Occupied Zone, AOZ)的通风阻力特性。在通过虚拟风洞试验验证CFD方法可靠性的基础上,对比了精细模型、无头模型、躯干模型和椭球模型4种不同简化模型对肉鸭AOZ气流阻力模拟精度的影响,并分析了肉鸭从7日龄至35日龄整个生长周期内AOZ阻力系数的变化规律。结果表明:

1)模拟风洞试验风速与实测值平均相对误差为6.18%,吻合度较好,该模型与数值计算方法能够应用于鸭群气流阻力系数的计算。

2)鸭只模型的简化程度对肉鸭AOZ的阻力系数具有显著影响。其中,无头模型与精细模型相比,在鸭笼区域长(X)、宽(Y)、高(Z)3个方向上的惯性阻力系数误差最小,分别为-15.7%,-13.1%和7.1%,在计算精度与效率之间取得了最佳平衡,是后续相关研究的推荐模型。采用躯干模型、椭球模型则会导致误差显著增大,最大达到-44.4%,不适用于精确模拟。

3)对比体重相近的肉鸭与蛋鸡阻力数据,肉鸭AOZ在 Y 方向惯性阻力显著低于蛋鸡, Z 方向则阻力高于蛋鸡,该差异源于鸭的扁平体型、高密度笼养布局及垂直投影叠加效应,证明蛋鸡阻力数值无法直接套用于肉鸭舍通风优化。

4)随着肉鸭体重从0.19 kg增大至2.82 kg, X 、 Y 和 Z 方向惯性黏性阻力系数均显著增加, Z 方向增幅最大。本研究确定的肉鸭不同生长阶段的阻力系数,能够适用于类似的中高密度叠层笼养禽舍环境。

参考文献 References

- [1] 侯水生,刘灵芝. 2024年水禽产业与技术发展报告[J]. 中国畜牧杂志, 2025, 61(3): 383-387
Hou S S, Liu L Z. Report on waterfowl industry and technology development in 2024[J]. *Chinese Journal of Animal Science*, 2025, 61(3): 383-387 (in Chinese)

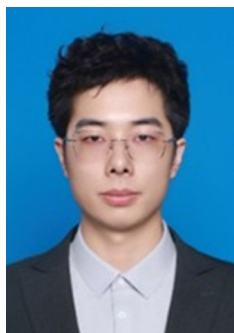
- [2] 王冲,张亚茹,卢国民,郑荷花,肖大勇,程好良,许毅. 肉鸭笼养模式与立体网养模式生产性能与经济效益对比分析[J]. 中国家禽, 2019, 41(17): 64-67
Wang C, Zhang Y R, Lu G M, Zheng H H, Xiao D Y, Cheng H L, Xu Y. Comparative analysis on production performance and commercial profit of duck under cages and stereo net-rearing production systems[J]. *China Poultry*, 2019, 41(17): 64-67 (in Chinese)
- [3] 吴艳,皮劲松,李成凤,王莹,梁振华,张昊,黄正洲,蒲跃进,潘爱奎,申杰,杜金平,孙静,彭先文. 夏季四层叠式笼养鸭舍环境参数测定与分析[J]. 中国家禽, 2019, 41(11): 32-36
Wu Y, Pi J S, Li C F, Wang Y, Liang Z H, Zhang H, Huang Z Z, Pu Y J, Pan A L, Shen J, Du J P, Sun J, Peng X W. Mensuration and analysis of environmental quality of layer house with four overlap cages in summer[J]. *China Poultry*, 2019, 41(11): 32-36 (in Chinese)
- [4] 鲍恩财,林勇,赵伟,叶成智,闫俊书,宦海琳,孙雪峰,邹吉宝. 层叠式笼养肉鸭舍秋季最小通风的环境参数测试及分析[J]. 江苏农业学报, 2020, 36(3): 648-655
Bao E C, Lin Y, Zhao W, Ye C Z, Yan J S, Huan H L, Sun X F, Zou J B. Mensuration and analysis of environmental parameters in cascading cage-rearing meat duck house with minimum ventilation in the autumn[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2020, 36(3): 648-655 (in Chinese)
- [5] 林勇,代伟伟,夏礼如,柏宗春,王建辉,索川,梁越,孙玉伦,王强. 夏季不同环境控制方法对层叠式笼养肉鸭舍内环境的影响[J]. 中国家禽, 2024, 46(12): 85-92
Lin Y, Dai W W, Xia L R, Bai Z C, Wang J H, Suo C, Liang Y, Sun Y L, Wang Q. Effects of different environmental control methods in summer on indoor environment of cascading cage-rearing meat duck house[J/OL]. *China Poultry*, 2024, 46(12): 85-92 (in Chinese)
- [6] Wu B, Qin L W, Wang M, Zhou T, Dong Y X, Chai T J. The composition of microbial aerosols, $PM_{2.5}$, and PM_{10} in a duck house in Shandong province, China[J]. *Poultry Science*, 2019, 98(11): 5913-5924
- [7] Du L H, Yang C W, Dominy R, Yang L, Hu C M, Du H R, Li Q Y, Yu C L, Xie L Z, Jiang X S. Computational Fluid Dynamics aided investigation and optimization of a tunnel-ventilated poultry house in China[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2019, 159: 1-15
- [8] Tong X J, Hong S W, Zhao L Y. CFD modeling of airflow, thermal environment, and ammonia concentration distribution in a commercial manure-belt layer house with mixed ventilation systems[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2019, 162: 281-299
- [9] Ma H, Tu Y N, Yang X T, Yang Z X, Liang C. Influence of tunnel ventilation on the indoor thermal environment of a poultry building in winter[J]. *Building and Environment*, 2022, 223: 109448
- [10] Rojano F, Bournet P E, Hassouna M, Robin P, Kacira M, Choi C Y. Computational modelling of thermal and humidity gradients for a naturally ventilated poultry house[J]. *Biosystems Engineering*, 2016, 151: 273-285
- [11] Ahmadi B K, Khorasanizadeh H, Aghaei A. CFD modeling of air flow, humidity, CO_2 and NH_3 distributions in a caged laying hen house with tunnel ventilation system[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2022, 193: 106677
- [12] Yeo U H, Lee I B, Kim R W, Lee S Y, Kim J G. Computational fluid dynamics evaluation of pig house ventilation systems for improving the internal rearing environment[J]. *Biosystems Engineering*, 2019, 186: 259-278
- [13] Mondaca M R, Choi C Y, Cook N B. Understanding microenvironments within tunnel-ventilated dairy cow freestall facilities: Examination using computational fluid dynamics and experimental validation[J]. *Biosystems Engineering*, 2019, 183: 70-84

- [14] Iqbal A, Gautam K R, Zhang G, Rong L. Modelling of animal occupied zones in CFD[J]. *Biosystems Engineering*, 2021, 204: 181-197
- [15] Qi F, Zhao X D, Shi Z X, Rong L, Zhang G Q, Li H. Applicability evaluation of innovative simplified methods of slatted floor in pig houses - A CFD study [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2024, 216: 108532
- [16] Doumbia E M, Janke D, Yi Q Y, Amon T, Kriegel M, Hempel S. CFD modelling of an animal occupied zone using an anisotropic porous medium model with velocity depended resistance parameters [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2021, 181: 105950
- [17] Rong L, Aarnink A J A. Development of ammonia mass transfer coefficient models for the atmosphere above two types of the slatted floors in a pig house using computational fluid dynamics[J]. *Biosystems Engineering*, 2019, 183: 13-25
- [18] Kwon K S, Lee I B, Zhang G Q, Ha T. 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
- [19] Wu X F, Shi Z X, Li H. Study on the air resistance of pigs in groups based on open-source CFD code: Influence of stocking density and live weight[J]. *Biosystems Engineering*, 2022, 220: 1-18
- [20] Li H, Rong L, Zong C, Zhang G Q. A numerical study on forced convective heat transfer of a chicken (model) in horizontal airflow [J]. *Biosystems Engineering*, 2016, 150: 151-159
- [21] Cheng Q Y, Wu W T, Li H, Zhang G Q, Li B M. CFD study of the influence of laying hen geometry, distribution and weight on airflow resistance[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2018, 144: 181-189
- [22] Xin Y C, Rong L, Wang C Y, Li B M, Liu D Z. CFD study on the impacts of geometric models of lying pigs on resistance coefficients for porous media modelling of the animal occupied zone[J]. *Biosystems Engineering*, 2022, 222: 93-105
- [23] Defraeye T, Verboven P, Nicolai B. CFD modelling of flow and scalar exchange of spherical food products: Turbulence and boundary-layer modelling[J]. *Journal of Food Engineering*, 2013, 114(4): 495-504
- [24] Seo I H, Lee I B, Moon O K, Hong S W, Hwang H S, Bitog J P, Kwon K S, Ye Z Y, Lee J W. Modelling of internal environmental conditions in a full-scale commercial pig house containing animals[J]. *Biosystems Engineering*, 2012, 111(1): 91-106
- [25] Močnik U, Ante Č, Muhič S. Numerical and experimental analysis of fluid flow and flow visualization at low Reynolds numbers in a dimple pattern plate heat exchanger[J]. *Energy*, 2024, 288: 129812

责任编辑: 刘迎春



第一作者简介: 姜宇晨, 硕士研究生, 2023年9月至今就读于山东农业大学动物科技学院畜牧专业。主要研究方向为禽舍通风调控。参与山东省重点研发计划2项, 曾获山东农业大学硕士一等奖学金。



通讯作者简介: 严格齐, 男, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。研究方向为畜禽舍智能环境调控技术与装备, 畜禽健康养殖工艺、行为与福利。在《农业工程学报》, *Computers and Electronics in Agriculture*, *Biosystems Engineering* 等国内外学术期刊发表学术论文10余篇, 近5年参与国家重点研发项目、国家现代农业产业技术体系专项等课题。