

## 大型叠层笼养肉鸡舍气流组织模拟与优化

纪文康<sup>1</sup>, 施志钢<sup>1,\*</sup>, 张璐瑶<sup>1</sup>, 王琪琪<sup>1</sup>, 高新明<sup>2</sup>

(1. 青岛理工大学 环境与市政工程学院, 青岛 266525; 2. 山东信得科技股份有限公司, 潍坊 262200)

**摘要:** 针对大型叠层笼养肉鸡舍过渡性通风模式下温度分布不均的问题, 通过现场实测建立三维数学模型, 采用计算流体动力学方法对试验鸡舍进行气流组织模拟分析, 提出改进方案并进行测试验证。结果显示: 鸡舍内部气流分布不均, 大部分气流从鸡舍上方空间流出舍外, 未与肉鸡充分换热; 鸡舍长度方向上温差大, 前后最大温差可达 4 °C, 给整体调控带来难度。在天花板下安装导流板可以明显增加肉鸡生活区气流速度, 肉鸡生活区域平均风速提高了 29%~61%, 有效提高了室外空气利用率和鸡舍换热效率, 使前后温差控制在 2 °C 以内。研究表明天花板下导流板的合理使用可以有效改善鸡舍气流组织, 使鸡舍内温度保持良好的均匀性。

**关键词:** 肉鸡舍; 过渡性通风; 计算流体动力学; 气流组织

**中图分类号:** TU264<sup>+</sup>.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4602(2024)02-0147-08

## Simulation and optimization of the air distribution of large stacked cage broiler coop

Ji Wenkang<sup>1</sup>, Shi Zhigang<sup>1,\*</sup>, Zhang Luyao<sup>1</sup>, Wang Qiqi<sup>1</sup>, Gao Xinming<sup>2</sup>

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China;  
2. Shandong Sinder Technology Co. Ltd., Weifang 262200, China)

**Abstract:** Aiming to solve the problem of uneven temperature distribution in transitional ventilation mode of large stacked cage broiler coop, a three-dimensional mathematical model was established through field measurement. The computational fluid dynamics (CFD) method was adopted to simulate and analyze the air distribution of experimental broiler coop, and an improved scheme was proposed and tested for verification. The results showed that the air distribution in the broiler coop was uneven; most of the air flowed out of the house from the space above the broiler coop, failing to fully exchange heat with the broilers. The temperature difference in the length direction of the broiler coop was large, and the maximum temperature difference between the front and the back reached 4 °C, which brought difficulty to the overall control. The airflow velocity in the living area of broilers could be significantly increased by installing the deflector under the ceiling. The average wind speed in the living area of broilers was increased by 29%—61%, which effectively improved the outdoor air uti-

收稿日期: 2023-02-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52078257); 德阳市揭榜挂帅重大项目(2022JBZG002)

作者简介: 纪文康(1998-), 男, 山东济宁人。硕士, 研究方向为流体与传热模拟仿真。E-mail: jiwenkang98@163.com。

\* 通信作者: 施志钢(1975-), 男, 山东青岛人。博士, 副教授, 主要从事流体与传热模拟仿真、可再生能源利用研究。  
E-mail: shi\_zhi\_gang@163.com。

lization rate and the heat transfer efficiency of the broiler coop and consequently the temperature difference between the front and the back was controlled within 2 °C. The research showed that the reasonable use of the deflector under the ceiling could effectively improve the air distribution of the broiler coop and make the temperature in the broiler coop maintain good uniformity.

**Key words:** broiler coop; transitional ventilation; CFD; air distribution

温度与气流速度是影响畜禽生产最直接的环境因素<sup>[1]</sup>。白羽肉鸡在我国肉鸡产业中具有重要地位,为肉鸡提供合适的环境是提高肉鸡养殖效益的关键<sup>[2]</sup>。在鸡舍的环境控制中,主要通过通风换气为鸡群提供生活所需的氧气,并通过与外界气流的热湿交换带走鸡舍产生的热量和污染物。在国内外大型鸡舍养殖领域,纵向通风和侧窗横向通风一体化鸡舍得到了广泛的推广和应用<sup>[3]</sup>,在既要对鸡舍进行通风降温又要避免冷应激的春秋季节,以两侧小窗进风、纵向风机排风的过渡性通风方式被鸡舍广泛采用<sup>[4]</sup>。然而随着对肉鸡需求的不断增加,肉鸡养殖规模不断扩大,集约化程度越来越高,舍内风速场和温度场的分布不均、通风效率不高等问题也越来越突出,因此通过合理的气流组织设计使舍内达到肉鸡适宜的生长环境是养殖产业亟待解决的问题。

近年来研究人员将计算流体动力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)应用到畜禽舍环境的研究中,取得了较好的进展。国内外学者采用计算模拟的方法对禽舍的通风性能、气流组织、能耗等进行了相关研究,并对禽舍的结构和通风系统进行了优化<sup>[5-12]</sup>。SEO等<sup>[13]</sup>比较了冬季不同的通风口位置对肉鸡舍通风效果的影响,发现采用烟囱进风的形式气流组织最佳,且可以节省肉鸡区47%的能量输入。汪开英等<sup>[14]</sup>运用CFD对冬季猪舍内热环境进行了模拟研究,并以此评估猪舍内环境质量。程琼仪等<sup>[15]</sup>研究了不同湿帘进风位置对鸡舍气流和温度的影响。李国建等<sup>[16]</sup>比较了冬季不同风机开启方案对舍内温度场、风速场的影响。尚峰军等<sup>[17]</sup>对新疆地区密闭式鸡舍进行模拟分析,对夏季湿帘开启工况下结构及进风位置进行了改良优化。江晓明等<sup>[18]</sup>针对密闭式半阶梯笼养蛋种鸡舍春秋季节的过渡性通风方式,利用CFD分析侧窗导流板与壁面的倾角对舍内速度场和温度场均匀性的影响,得出了更加合理的开启角度。大量研究表明,利用CFD技术对畜禽舍内部环境进行分析是行之有效的。

本研究基于山东沂南某密闭式叠层笼养肉鸡舍,在过渡性通风模式下,通过实地测量鸡舍内外环境和边界条件,运用CFD对舍内气流组织进行模拟分析及优化研究,改善舍内环境以达到肉鸡适宜的生长环境,以为密闭式叠层笼养肉鸡舍通风系统的优化改进提供理论参考。

## 1 鸡舍环境测试及模拟

### 1.1 鸡舍气流及温度现场测试

试验鸡舍位于山东省沂南县(N118°67', E35°49')某规模化大型肉鸡养殖基地。基地坐北朝南,东西距离约160 m,南北距离约255 m。基地共有10栋鸡舍,鸡只品种为白羽肉鸡,舍间距5.5 m。鸡舍内宽度17.3 m,长度100 m,檐高4.7 m,顶高7.3 m。鸡舍内部采用四层六列养殖模式,笼子总高2.6 m,分四层,笼底距地面0.35 m,笼层高0.45 m,笼间距0.15 m,笼顶距侧窗底线1.2 m。笼具每列91组,规格1 m×1.25 m×0.44 m。笼具下面均有粪便传送带,每栋鸡舍养殖白羽肉鸡54 600只,鸡舍实况如图1所示。



图1 试验鸡舍实景

鸡舍内部为东西走向,通风系统由24台直径1.38 m的拢风筒风机(青岛大牧人机械股份有限公司)组成,风机额定功率1.1 kW,排风量42 000 m<sup>3</sup>/h。前端山墙(以湿帘端为前端)及南北侧墙共布置有三

面湿帘,南北侧墙各有小窗 103 个,前端山墙有小窗 7 个,小窗规格为 0.3 m×0.6 m,间隔 0.3 m,侧窗底线距地 3.8 m,通风系统如图 2 所示。鸡舍通过安装在末端山墙(风机端为末端)的负压风机排风,在过渡性通风形式下关闭湿帘和前端山墙小窗,使气流从侧墙上方的进风口进入鸡舍,在导流板的作用下进入鸡舍的气流先经顶部预热,而后下降到达肉鸡生活区。笔者所在课题组在 2022 年 5 月对该鸡舍的内外环境参数进行了连续 1 个月的现场测试,采用温湿度传感器(JXBS-3001-TH,威海精讯畅通电子科技有限公司)、热线式风速仪(KANOMAX6004,日本 KANOMAX 公司)对舍内温度、风速进行测量。图 3 为内部数据测点分布,测点布置在 3 条走道(过道 2、过道 4、过道 6,分别用 A、B、C 表示)距离前端墙 10、30、50、70、90 m 处,距地面 1、2 m(分别用 A1、A2 表示),共 30 个测点。采用热成像仪(FLIR E8-XT,美国菲力尔公司)对壁面温度进行测量,热线式风速仪(KANOMAX6004,日本 KANOMAX 公司)对风机出口速度进行实测。壁面温度及风机出口速度测量采用五点法取平均值。

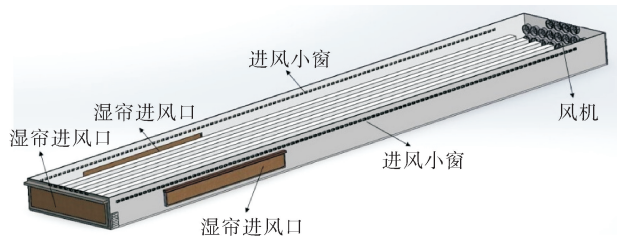


图 2 鸡舍通风系统示意

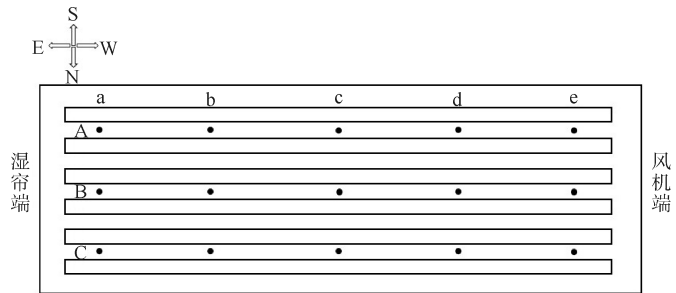


图 3 鸡舍内部测点布置

### 1.2 鸡舍模型建立

根据实测情况建立 1 : 1 鸡舍全尺寸模型,以鸡舍纵向长度方向为  $z$  方向,取值范围为 0~100 m;宽度方向为  $x$  方向,取值范围为-8.65~8.65 m;高度方向为  $y$  方向,取值范围为 0~7.3 m。采用 Mesh 对鸡舍模型进行网格划分,网格划分时对风机出口、小窗入口、鸡笼壁面、导流板进行单独网格划分,网格为非结构化网格并经过独立性检验。舍内空气设置为不可压缩流体,流场模型满足质量守恒、动量守恒、能量守恒。采用 Fluent 进行数值求解,湍流模型选用 RNG  $k-\epsilon$  湍流模型,近壁面采用标准壁面函数,压力-速度耦合采用 SIMPLE 算法,动量和湍流动能选用二阶迎风格式,松弛因子采用默认值。

### 1.3 边界条件设置

本次模拟认为风机处于稳态运行,模拟状态设置为稳态模拟。将鸡舍小窗进风口设置为压力入口,室外空气温度取白天测量平均温度 20 °C,风机出口设置为速度出口,风机开启台数满足 1 min 通风量要求,将鸡群设置为恒温热源,表面温度 37 °C,将舍内墙壁、屋顶、地面均设置为无滑移壁面,壁面温度通过实测获得(表 1)。为保证数值模拟结果的准确性,对网格进行无关性检验。

表 1 鸡舍实际测量的边界条件

位置	边界条件
东墙	无滑移壁面,温度 19.6 °C
西墙	无滑移壁面,温度 22.4 °C
南墙	无滑移壁面,温度 22.6 °C
北墙	无滑移壁面,温度 22.8 °C
屋顶南	无滑移壁面,温度 22.1 °C
屋顶北	无滑移壁面,温度 21.5 °C
地面	无滑移壁面,温度 21.4 °C
鸡群	无滑移壁面,温度 37.0 °C
舍外	温度 20.0 °C
进风小窗	压力入口,静压 0 Pa
风机	速度出口,风速 7 m/s

## 2 结果与分析

### 2.1 鸡舍气流组织模拟结果

在过渡性通风模式下,外界空气从两侧小窗进入鸡舍,空气沿鸡舍顶部运动,在中部汇集后下降,与鸡笼区的肉鸡进行热量传递,达到给肉鸡生活区通风降温的目的。

在  $z$  方向上选取  $z=20、40、60、80$  m 4 个横截面速度云图(图 4),鸡舍前端受风机影响较小,未形成

纵向主流风,上方紊流区较明显,鸡笼区风速差异较大。随着距离增加,横截面整体风速上升,风速场趋于稳定,均匀性较前端有明显提升。从图4可以看出,鸡舍上部气流速度明显高于鸡笼区域,大量空气从鸡笼上方通过,不利于鸡笼区的降温 and 通风换气。在宽度方向取  $x=4.9\text{ m}$  纵向截面速度云图(图5),由图5可以看出,长度方向上沿距离增加风速明显增加,山墙端平均约  $0.3\text{ m/s}$ ,近风机端风速约  $1.5\text{ m/s}$ ,不同层鸡笼区风速场无明显差异。

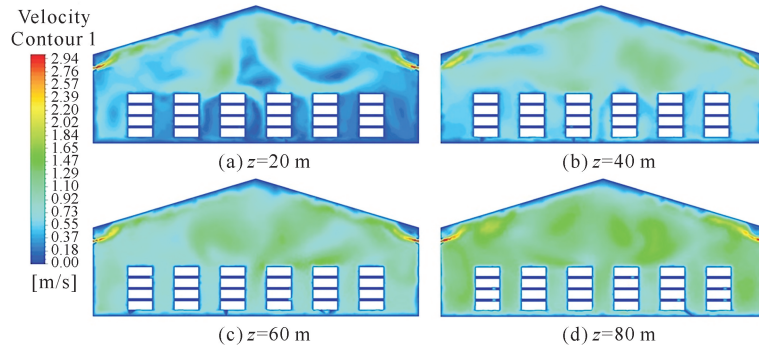


图4 不同距离的风速场

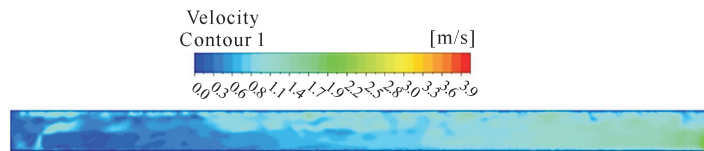


图5  $x=4.9\text{ m}$  过道截面风速场

在纵向通风的模式下,对于鸡舍来说,横截面积不变,随着距离增加横截面上通过的风量增加,因此横截面上平均风速随距离增加而增加,并且随着距离的增加风速场不断趋于稳定。由上面分析可知鸡舍前端风机作用弱,气流均匀性差,两侧存在大面积紊流区,鸡舍上方空间流速大,鸡笼区域流速缓慢,不利于排除污染物及带走鸡笼区热量。随着距离增加,纵向速度增加,两侧及下部区域紊流逐渐减小,鸡笼区气流速度得到提升,但与上部气流速度仍存在差距。

在  $z$  方向上选取  $z=20, 40, 60, 80\text{ m}$  4 个横截面温度云图(图6),由图6 仿真结果可以看出,鸡舍上部空间温度明显低于肉鸡生活区,大部分室外冷空气进入鸡舍后在顶部堆积,鸡舍上部空气温度偏低,这是因为部分室外空气未与肉鸡充分换热直接从鸡舍上部排出。

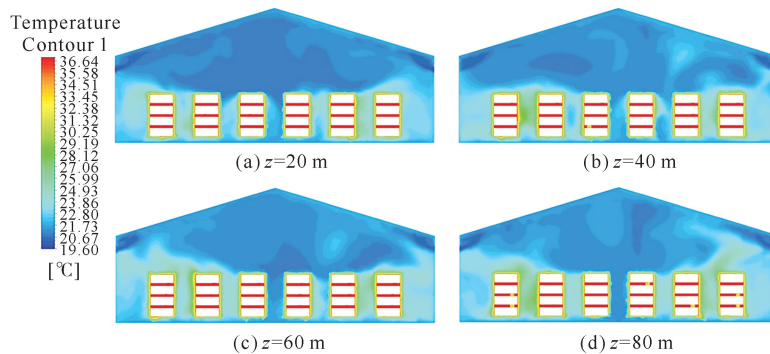


图6 不同距离的温度场

在宽度方向取  $x=4.9\text{ m}$  纵向截面温度云图(图 7),舍内温度沿长度方向逐渐升高,前端靠近山墙处温度最低,靠近末端风机处温度最高,前后温差过大。最上层鸡笼区域温度相对较低,这是因为过渡性通风模式下室外空气从上方进入鸡笼区,首先与上层鸡笼发生热传递,在下降的过程中,给肉鸡降温的同时,空气被加热,温度有较为明显的升高,对下层鸡笼的降温能力减弱。由模拟结果可知,鸡舍中后段存在大面积高温聚集区,通风效果较差,十分不利于肉鸡的正常生长。

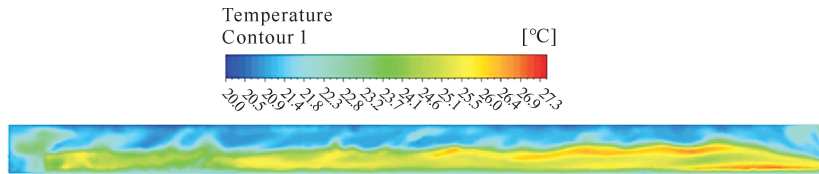


图 7  $x=4.9\text{ m}$  过道截面温度场

### 2.2 气流组织改良方案

通过以上模拟可以发现,在现有鸡舍纵向通风模式下,天花板下预留空间在一定程度上影响了气流组织分布,大部分舍外空气从鸡舍上部通过,鸡舍生活区气流速度低、通风性差,导致中后段通风换热效率低,舍内前后温差过大。针对以上问题,在天花板下增加导流板将气流引至肉鸡生活区。为避免导流板对鸡舍内部设备运转及生产活动的影响,将导流板底部距离侧墙顶部高度设为  $0.5\text{ m}$ ,分别在导流板间距  $d=5、10、15、20\text{ m}$  时对鸡舍内部环境进行模拟。

### 2.3 改良后鸡舍风速与温度变化

#### 2.3.1 速度场改良结果

选取各模型在过道 2 纵向垂直切面作为比较面,各模型的风速场云图见图 8。

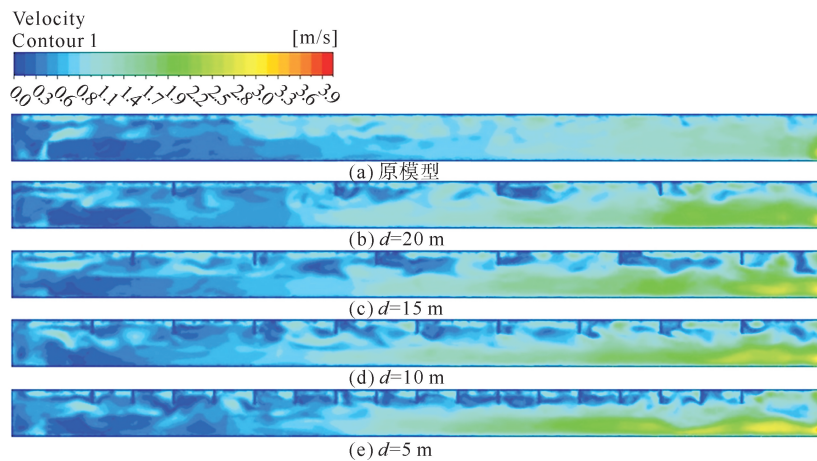


图 8 不同导流板间距下鸡舍风速对比云图

模拟结果表明,导流板可明显增加肉鸡生活区气流速度,在未安装导流板时鸡舍上部空间气流速度明显高于肉鸡生活区。加装导流板后,由于导流板对上部气流的阻挡作用,更多气流被引导至鸡舍下部生活区域,对中后段风速提升幅度较大。相比没有安装导流板的鸡舍,安装不同间距的导流板均能有效提高鸡舍通风效率,对于降温效果较差的中后区域,一方面风速的提高可以提高对流换热效率,从而带走更多的热量;另一方面风速的提高有利于舍内产生的有害气体的排出,为肉鸡提供更为舒适的生长环境。

图 9 为各间距下沿长度方向肉鸡生活区域平均风速变化。由图 9 可以看出,原模型整体风速较低,绝大部分区域风速小于  $1\text{ m/s}$ ,在  $70\text{ m}$  处风速达到  $1\text{ m/s}$  以上,增加导流板后生活区平均风速提高了

29%~61%，安装各间距导流板的鸡舍风速均在60 m处达到1 m/s以上，中后段风速得到明显提升，最大风速提高到了2 m/s左右。结果表明，不同间距的导流板均能提高鸡舍生活区气流速度，导流板间距的改变并不会改变气流速度的变化趋势，随着导流板间距的减小，对气流速度的提升效果更加显著，理论上更小间距的导流板下鸡舍气流速度更大。

### 2.3.2 温度场改良结果

选取各模型在过道2纵向垂直切面作为比较面，各模型的温度对比云图见图10。

模拟结果表明，相比于没有安装导流板的鸡舍，安装导流板后鸡舍中后段高温区明显减少，温度明显下降，鸡舍整体温度均匀性较好。这说明在安装不同间距的导流板模式下，导流板不仅提高了生活区气流速度，对于鸡舍生活区域降温效果也有明显提升，改善了由于上方空气流走对鸡舍中后段降温不足的问题，大大提高了室外冷气的利用效率。

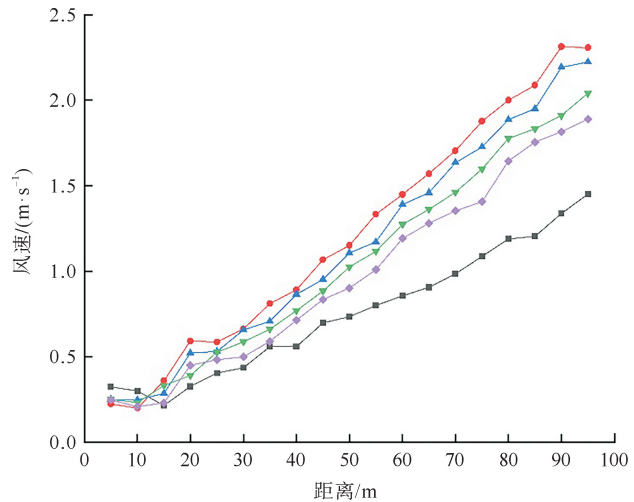


图9 不同导流板间距下沿长度方向肉鸡生活区域平均风速变化  
 —■— 无导流板；—●— 5 m；—▲— 10 m；—▼— 15 m；—◆— 20 m

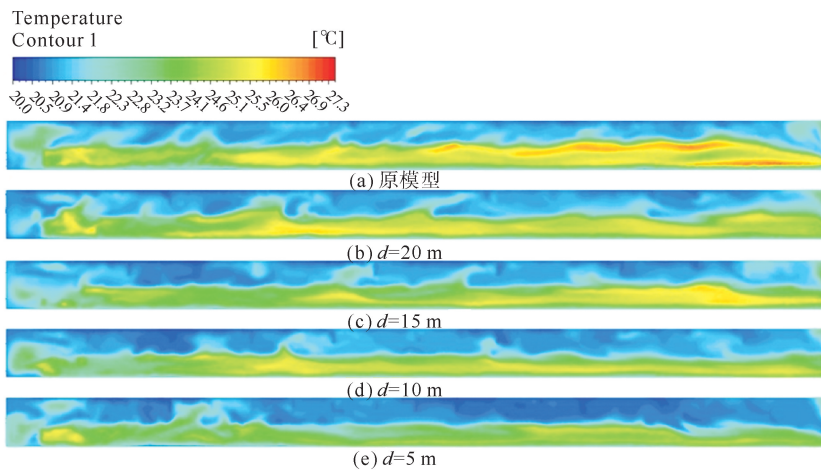


图10 不同导流板间距下鸡舍温度对比云图

图11为各方案下沿长度方向肉鸡生活区域平均温度变化。由图11可知，鸡舍原模型前端温度23℃左右，后端温度27℃左右，前后温差4℃。增加导流板后温度均有明显降低，整体降温效果良好，尤其中后段高温区降温效果明显，最高温度降低了2~3℃，且前后端温差明显减小，整体温度在23~25℃，鸡舍整体温度均匀性较好。在不同间距的导流板影响下，鸡舍温度变化趋势一致，换热效率均有明显提高，肉鸡生活区域平均温度降低了0.7~1.8℃。随着导流板间距减小，降温效果更明显，前后温差更小，理论上更小间距的导流板可以使肉鸡生活区前后温度更加均匀。

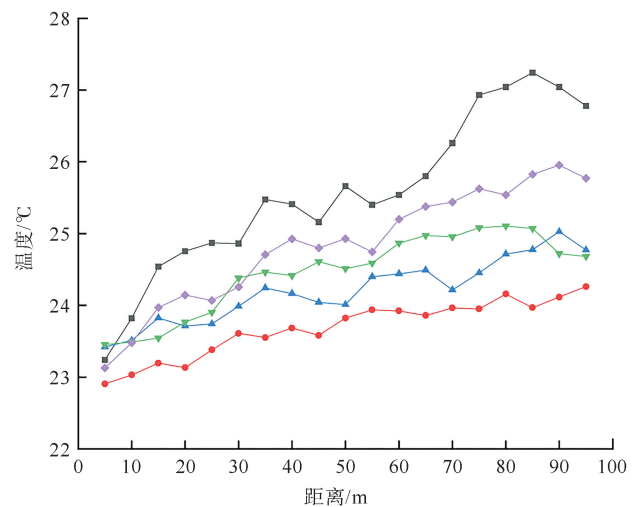


图11 不同导流板间距下沿长度方向肉鸡生活区域平均温度变化  
 —■— 无导流板；—●— 5 m；—▲— 10 m；—▼— 15 m；—◆— 20 m

## 2.4 数值模拟结果验证

2022年5月13日在鸡舍安装20 m间距导流板时对鸡舍环境参数进行了现场测试,测试点位置如图3所示。速度场和温度场的测量结果与模拟结果的比较如图12所示,通过计算得到,气流速度的模拟值和实测值的相对误差在1.4%~25.1%,温度模拟值与实测值的相对误差在0.4%~8.3%,总体结果表明模拟结果与实测结果拟合度较高。导致误差的原因可能有以下3个方面:①模拟未考虑照明等设备对散热的影响;②在建立鸡舍模型时对食槽、笼架、清粪装置等相关实体进行了合理地简化,因为以上设备对鸡舍内部的气流组织也有一定程度的影响;③气流速度相对误差较高的点大多位于鸡舍前端微风速区,该区域测量难度较大,存在测量误差。

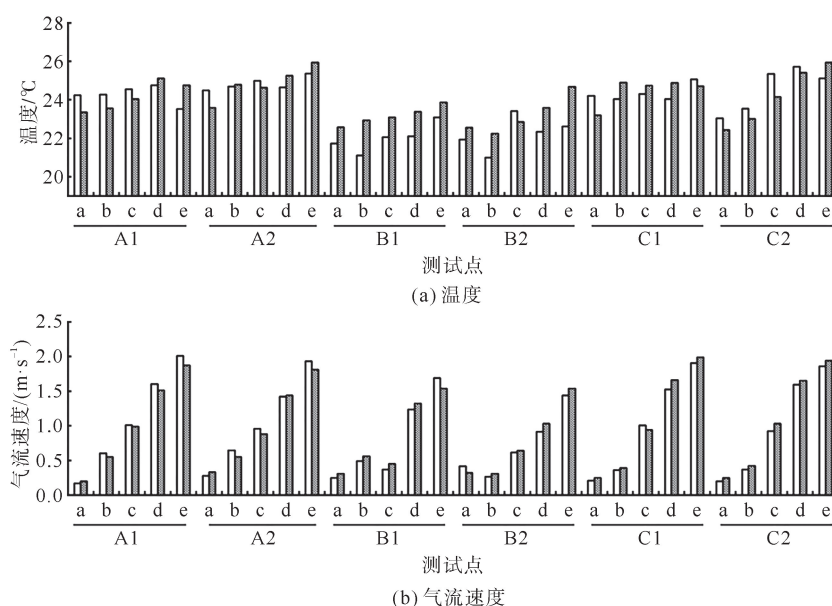


图12 各测点温度和气流速度模拟值与测试值

□ 模拟值; ■ 实测值

## 3 结论

通过对大型封闭式叠层笼养肉鸡舍在过渡性通风形式下的气流组织进行数值模拟分析和现场实测,得出了以下结论:

- 1) 鸡舍天花板下预留空间在一定程度上影响了鸡舍内的气流组织均匀性,降低了鸡舍通风换热效率。大部分气流从鸡舍上方空间流出室外,未与肉鸡充分换热,导致鸡舍长度方向上温差较大。
- 2) 在天花板下加装导流板可以明显提高鸡舍生活区气流速度,提高鸡舍通风效率和室外空气利用率,降低鸡舍前后温差,使鸡舍内温度更为均匀,降低了整体控制难度。
- 3) 在一定程度上,导流板间距越小,鸡舍生活区气流速度越大,鸡舍通风效率越高,温度均匀性越好。

### 参考文献(References):

- [1] 马承伟,苗香雯. 农业生物环境工程[M]. 北京:中国农业出版社,2005.  
MA Chengwei, MIAO Xiangwen. Agricultural biological environmental engineering[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2005.
- [2] 黄炎坤,刘健,王鑫磊,等. 环境应激对白羽肉鸡生产性能的影响分析[J]. 家畜生态学报,2016,37(7):78-82.  
HUANG Yankun, LIU Jian, WANG Xinlei, et al. Effect of environmental stress on production performance of white feather broilers[J]. Journal of Domestic Animal Ecology, 2016, 37(7): 78-82.
- [3] 王广胜,李春红,汪全生. 中国蛋鸡规模化 and 标准化鸡舍设计模式探讨[J]. 中国畜牧杂志,2008,44(2):47-51.  
WANG Guangsheng, LI Chunhong, WANG Quansheng. Discussion on the design mode of large-scale and standardized chicken coop of laying hens in China[J]. Chinese Journal of Animal Science, 2008, 44(2): 47-51.

- [4] 尤永君,乔昌明,徐良,等.白羽肉鸡现代化密闭鸡舍负压纵向通风管理技术[J].中国家禽,2014,36(16):47-50.  
YOU Yongjun,QIAO Changming,XU Liang,et al. Modern closed chicken coop negative pressure longitudinal ventilation management technology for white feather broilers[J]. China Poultry,2014,36(16):47-50.
- [5] BLANES-VIDAL V,GUIJARRO E,BALASCH S,et al. Application of computational fluid dynamics to the prediction of airflow in a mechanically ventilated commercial poultry building[J]. Biosystems Engineering,2008,100(1):105-116.
- [6] BUSTAMANTE E,GARCIA-DIEGO F J,CALVET S,et al. Measurement and numerical simulation of air velocity in a tunnel-ventilated broiler house[J]. Sustainability,2015,7(2):2066-2085.
- [7] 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.
- [8] 毛竹,管一鸣,胡松涛,等.种公猪舍环境控制系统设计参数研究与建议[J].青岛理工大学学报,2020,41(2):108-113.  
MAO Zhu,GUAN Yiming,HU Songtao,et al. Study and suggestions on design parameters of the environmental control system in stock boar houses[J]. Journal of Qingdao University of Technology,2020,41(2):108-113.
- [9] 闫安,石岩,于伟洋.基于CFD模拟的禽舍内气流组织方式优化[J].吉林建筑大学学报,2021,38(6):41-45.  
YAN An,SHI Yan,YU Weiyang. Optimization of airflow organization pattern in the poultry house based on CFD simulation[J]. Journal of Jilin Jianzhu University,2021,38(6):41-45.
- [10] BUSTAMANTE E,CALVET S,ESTELLES F,et al. Measurement and numerical simulation of single-sided mechanical ventilation in broiler houses[J]. Biosystems Engineering,2017,160:55-68.
- [11] TONG X,HONG S W,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.
- [12] 张宝安,张学军,史增录,等.新疆南疆地区林果园鸡舍结构优化与CFD通风设计[J].中国家禽,2021,43(6):53-60.  
ZHANG Baoan,ZHANG Xuejun,SHI Zenglu,et al. Structural optimization and CFD ventilation design of forest orchard hen house in Southern Area of Xinjiang[J]. China Poultry,2021,43(6):53-60.
- [13] SEO I H,LEE I B,MOON O K,et al. Improvement of the ventilation system of a naturally ventilated broiler house in the cold season using computational simulations[J]. Biosystems Engineering,2009,104(1):106-117.
- [14] 汪开英,李开泰,李王林娟,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.
- [15] 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 Qiongyi,MU Yu,LI Baoming. CFD simulation of influence of air supply location on airflow and temperature in stacked-cage hen house with tunnel ventilation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2019,35(15):192-199.
- [16] 李国建,杨林,许金钗,等.基于CFD的笼养鸡舍冬季通风方案模拟与验证研究[J].黑龙江畜牧兽医,2021(21):57-62.  
LI Guojian,YANG Lin,XU Jinchai,et al. Simulation and verification studies of ventilation schemes in stacked-cage hen house based on CFD in winter[J]. Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine,2021(21):57-62.
- [17] 尚峰军,赵洁.采用CFD技术分析和评估蛋鸡舍温热环境质量[J].中国家禽,2021,43(2):61-68.  
SHANG Fengjun,ZHAO Jie. Using CFD technology to analyze and evaluate the quality of the warm environment of layer house[J]. China Poultry,2021,43(2):61-68.
- [18] 江晓明,张衍林,张兴广,等.基于CFD的密闭式半阶梯笼养蛋鸡舍过渡性通风研究[J].华中农业大学学报,2017,36(6):113-120.  
JIANG Xiaoming,ZHANG Yanlin,ZHANG Xingguang,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.

(责任编辑 张晓靖;英文校审 程文华)