

低屋面横向通风牛舍温湿度场 CFD 模拟

邓书辉^{1,2}, 施正香^{1*}, 李保明¹

(1. 中国农业大学水利与土木工程学院, 农业部设施农业工程重点实验室, 北京 100083;
2. 黑龙江八一农垦大学工程学院, 大庆 163319)

摘要: 在中国华东地区最炎热的月份, 舍外高温高湿的气候条件, 降低了低屋面横向通风 (low profile cross ventilated, LPCV) 牛舍的环境调控效果。为了研究 LPCV 牛舍温湿度场的分布规律, 该文在现场实测的基础上, 采用计算流体力学 CFD (computational fluid dynamics) 方法, 对 LPCV 牛舍的温度和相对湿度参数进行了三维数值模拟。现场实测的结果表明, 舍外空气温度为 36.2℃, 相对湿度为 55.5% 的条件下, 舍外空气流经湿帘后的降温幅度为 7.7℃, 湿帘出口处的相对湿度为 99.9%; 模拟结果表明, 舍内温湿度场受气流场的影响, 分布不均匀, 风速高的区域温度相对较低, 舍内相对湿度与温度呈现强烈的耦合关系。随着空气的流动, 沿气流方向平均每米长度温度升高 0.014℃、相对湿度下降 0.04%, THI 增加 0.025。模拟值与实测值的对比表明, 9 个测点温度和相对湿度的测试值与模拟值之间相对误差的平均值分别为 0.89% 和 0.59%, 理论计算和数值模拟得到的奶牛显热散热量的相对误差为 14.5%, 说明现场实测与数值模拟有较好的吻合度。该研究可为中国 LPCV 牛舍结构优化设计和环境调控提供参考。

关键词: 计算流体力学; 温度; 湿度控制; 低屋面横向通风; 奶牛舍; 数值模拟

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.09.032

中图分类号: S817.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-09-0209-06

邓书辉, 施正香, 李保明. 低屋面横向通风牛舍温湿度场 CFD 模拟[J]. 农业工程学报, 2015, 31(9): 209—214.

Deng Shuhui, Shi Zhengxiang, Li Baoming. CFD simulation of temperature and humidity distribution in low profile cross ventilated dairy cattle barn[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(9): 209—214. (in Chinese with English abstract)

0 引言

低屋面横向通风 (low profile cross ventilated, LPCV) 牛舍作为一种牛舍建筑形式, 在中国各地大规模牛场建设中得到越来越多的关注和应用, 黑龙江、新疆、浙江、安徽等省份都有 LPCV 牛舍在投入运行。由于这类牛舍所营造的环境条件与中国现有的开放式牛舍或有窗式牛舍完全不同, 尤其是中国的南方地区, 夏季炎热潮湿的气候条件对于采用湿帘降温的 LPCV 牛舍的环境调控能力会产生极大的影响。如何开展良好的环境设计, 选择合理的调控方案和设备配套, 对满足奶牛生产的实际需要意义重大。美国学者曾对其境内各地的 LPCV 牛舍内环境做了大量的现场测试和研究^[1-3], 其中 Harner 等 2007 年 7 月至 8 月对美国的 4 栋 LPCV 牛舍环境的测试结果表明, 在牛舍宽度方向上, 每英尺长度温度平均升高 0.0092°F, 湿热指数 (temperature-humidity index, THI)

每 100 英尺增加 1 个单位^[4]。其研究结论都是结合了当地的气候条件得出的。国内在 LPCV 牛舍环境研究方面的报道较少, 多数是对应用现状的分析^[5-6], 曹士明等实测了现代牧业宝鸡牧场 LPCV 牛舍的温湿度参数, 当室外温度为 39.2℃、相对湿度为 38% 时, 风机全开情况下, 过帘空气温度下降了 12℃, 舍内温升不超过 1℃^[7]。笔者在文献[8]中通过现场实测和 CFD 数值的方法, 分析了 LPCV 牛舍内空气流场的分布规律, 但没有涉及到舍内温度和相对湿度的研究。

温湿度是评价环境状况和实施环境调控的关键性因子。基于计算流体力学的数值模拟是研究温湿度场分布的有效手段。国外学者先后对温室、肉鸡舍及猪舍等农用建筑的热湿环境进行了数值模拟^[9-11], 国内学者对温室内温度场和相对湿度场的模拟较多^[12-15], 对畜禽舍内环境的数值模拟大多只针对气流场和温度场^[16-18], 很少涉及对相对湿度场的数值模拟。过高和过低的相对湿度都会对畜禽舍内的家畜健康产生影响, 尤其在高温、高湿的环境中, 畜体的散热更为困难, 加剧了家畜的热应激^[19]。另一方面, 牛舍内空气的温度分布一般都与潜热和相对湿度有关, 如不考虑潜热和相对湿度, 势必造成温度场计算的不准确, 也不便于评价各点的舒适性和空气品质^[20]。

本文对 LPCV 牛舍内外的环境参数进行了现场测试, 并在文献[8]的基础上进一步对 LPCV 牛舍内的温湿度场进行了 CFD 三维数值模拟。模拟时将奶牛按与实物原型

收稿日期: 2015-02-02 修订日期: 2015-04-15

基金项目: 国家奶牛产业技术体系资助项目 (CARS-37); 公益性行业 (农业) 科研专项资助项目 (201303091); 中央高校基本科研业务费专项资金资助 (2012YJ015)

作者简介: 邓书辉, 男, 黑龙江鸡东人, 副教授, 博士生, 主要从事健康养殖过程环境与控制研究。北京 中国农业大学水利与土木工程学院, 100083。
Email: dsh@vip.sina.com. 中国农业工程学会会员号: E040000151A

*通信作者: 施正香, 女, 江苏启东人, 教授, 主要从事畜禽养殖工艺与环境研究。北京 中国农业大学水利与土木工程学院, 100083。

Email: shizhx@cau.edu.cn

等比例引入到模型中, 并充分考虑了其散热和散湿量。文中还利用温湿指数 (THI) 对舍内不同区域环境的舒适程度进行分析和评价, 以期为中国 LPCV 牛舍的结构优化设计和环境调控提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 牛舍热湿环境参数现场测试

本文的试验牛舍位于中国华东地区, 与文献[8]中为同一栋牛舍, 舍内分为 12 个栏舍, 测试期间每个栏舍内平均饲养泌乳牛 150 头。LPCV 牛舍采用横向通风, 其舍内温湿度场的变化主要体现在牛舍的横断面方向。在舍内同一横断面上的湿帘出口、风机入口、颈枷和卧床等关键位置布置了 9 个测点, 测点高度为距地面 1.2 m, 布置如图 1 所示。舍内温湿度测试选用 HOBO U14 温度、相对湿度监测仪 (美国 Onset 公司), 该仪器的温度量程为 $-20\sim 50^{\circ}\text{C}$, 精度为 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$, 相对湿度的量程为 $0\sim 100\%$, 精度为 $\pm 2.5\%$ 。舍外环境参数测试采用 HOBO U21 便携式小型自动气象站 (美国 Onset 公司), 该气象站可测量的参数包括空气温度、相对湿度、风速、风向、太阳辐射。其中温度量程为 $-40\sim 100^{\circ}\text{C}$, 精度为 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$, 相对湿度的量程为 $0\sim 100\% \text{ RH}$, 精度为 $\pm 3\% \text{ RH}$ 。测试时将气象站架设在距牛舍 8 m 位置的舍外开阔地带。测试时间为 2012 年 7 月 23 日至 26 日, 所有参数的自动测量储存时间间隔为 30 s。

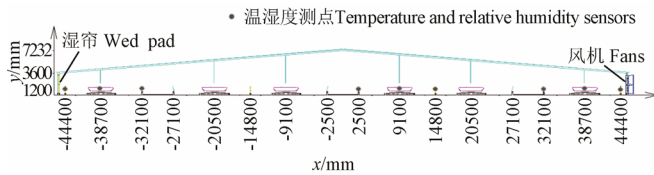


图 1 温湿度测点布置简图

Fig.1 Schematic diagram of temperature and relative humidity sensors locations

1.2 控制方程

流场中气体的流动要遵循的物理守恒定律包括质量守恒定律、动量守恒定律、能量守恒定律^[21]。牛舍内的相对湿度主要受水蒸气的影响, 为研究问题方便, 将舍内空气视为水蒸气和干空气组成的理想气体混合气体, 其在对流、扩散过程中同时要遵循组分守恒定律。模拟中将空气简化为不可压缩牛顿流体, 定常流动, 则各控制方程为:

质量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

能量守恒方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u T)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v T)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w T)}{\partial z} = \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\lambda}{c_p} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\lambda}{c_p} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\lambda}{c_p} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + S_T \end{aligned} \quad (2)$$

组分守恒方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u c_s)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v c_s)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w c_s)}{\partial z} = \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{D_s \partial(\rho c_s)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{D_s \partial(\rho c_s)}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{D_s \partial(\rho c_s)}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

动量守恒方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u w)}{\partial z} = \\ \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) - \frac{\partial p}{\partial x} \\ \frac{\partial(\rho v u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v w)}{\partial z} = \\ \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) - \frac{\partial p}{\partial y} \\ \frac{\partial(\rho w u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho w v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w w)}{\partial z} = \\ \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) - \frac{\partial p}{\partial z} - \rho g \end{aligned} \quad (4)$$

式中: u 、 v 、 w 为速度矢量在 x 、 y 、 z 方向的分量, m/s; p 为流体微元体上的压力, Pa; ρ 为流体密度, kg/m^3 ; T 为流体温度, K; λ 为流体导热系数, $\text{W/(m}\cdot\text{K)}$; c_p 为流体比热容, $\text{J/(kg}\cdot\text{K)}$; S_T 为流体内热源项, W; c_s 为组分 s 的浓度, kg/kg ; D_s 为组分 s 的扩散系数, m^2/s 。

1.3 几何模型

牛舍采用与实体建筑等比例创建, 并在长度方向上进行了缩减, 为充分考虑奶牛对舍内温度和相对湿度场的影响, 将奶牛按与实际等比例创建了 3D 模型, 本文中模拟的 LPCV 牛舍几何模型、奶牛模型以及网格划分与文献[8]完全一致。

1.4 边界条件

1.4.1 湿帘入口边界

定常流动模拟的时间点选择在 2012 年 7 月 24 日 13:30, 此时舍外温度为 36.2°C , 相对湿度 55.5%。舍外空气通过湿帘后, 温度降为 28.5°C , 降温幅度达到 7.7°C , 但相对湿度升高到 99.9%。模拟时将湿帘入口设为压力入口 (pressure inlet) 边界, 根据湿空气的含湿量计算出湿空气中水蒸气的组分。为准确模拟空气流经湿帘时压力损失与气流速度之间的关系, 将模型中湿帘的区域设置为多孔介质^[8]。

1.4.2 奶牛体表散热边界

将奶牛模型中的体表设为壁面 (wall) 边界, 热边界条件采用固定温度法确定。利用红外线热成像仪 ThermoCAM P30 (美国 Flir Systems 公司) 现场测试不同区域的奶牛体表温度。将计算出的平均体表温度作为奶牛模型中壁面边界的温度值。

1.4.3 奶牛呼吸传质边界

在奶牛舍内, 从奶牛的体表以及在呼吸过程中从呼吸器官的表面均会蒸发大量的水汽, 其产生的水汽量根据奶牛产生的潜热量, 按下式进行换算^[22]:

$$W_a = Q_l / 2450000 \quad (5)$$

式中: W_a 为奶牛散发的水汽量, kg/s ; Q_l 为奶牛潜热散

热量, W。

模拟时假设奶牛产生水汽全部从奶牛口中散出, 将牛口设为质量入口 (mass-flow inlet) 边界。

1.4.4 风机出口边界

将风机出口设为排气扇 (exhaust fan) 边界, 排气扇被假定为无限薄, 同时其两侧流体具有一定的压力差, 压力差大小是当地流体速度的函数^[23]。将风机实测的性能曲线数据拟合合成风机静压与风速间的 2 次多项式, 多项式的系数作为风扇边界条件压力跃升多项式的系数。

1.4.5 其他边界

将舍内墙壁、屋面、地面及卧床等均设为壁面 (wall) 边界, 壁面温度利用红外线热成像仪现场实测获得, 忽略舍内地面、水槽等处的水汽蒸发。为了减少模型长度方向缩短带来的误差, 将截取的山墙设为对称 (symmetry) 边界。

1.5 数值求解

采用 Fluent 软件进行数值求解, 选用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型, 近壁区的模拟采用标准壁面函数, 控制方程采用基于有限体积的离散方法, 压力-速度耦合选用 SIMPLEC 算法, 动量和湍流动能选用二阶迎风离散格式。

2 结果与分析

2.1 空气温度场模拟结果

舍内 $z=3\ 000\text{ mm}$ 横向断面空气温度云图如图 2 所示。挡风板和颈枷下面矮墙的设置影响了舍内气流分布的均匀性, 气流的高速区在牛舍横断面上呈波浪形分布^[8]。舍内温度场的分布主要受气流场的影响, 风速大的区域, 温度相对较低。舍内靠近屋面的位置由于空气流速最小而且屋面受太阳辐射的作用, 表面温度较高。图 3 为 $z=3\ 000\text{ mm}$ 横向断面上距离地面 $1\ 200\text{ mm}$ 处各点空气的温度和相对湿度值, 由图中可见, 随着空气的流动, 在牛舍宽度方向上温度总体呈现上升趋势, 风机入口与湿帘出口之间的温度差为 1.29°C , 每米长度温度平均升高 0.014°C 。因为模拟时假设奶牛全部处于采食状态, 由于牛体散热, 奶牛之间的缝隙区域温度较高, 图 3 中温度曲线的 3 个峰值都出现在这些区域。



图 2 舍内 $z=3\ 000\text{ mm}$ 截面温度云图

Fig.2 Contours of temperature at $z=3\ 000\text{ mm}$ cross section

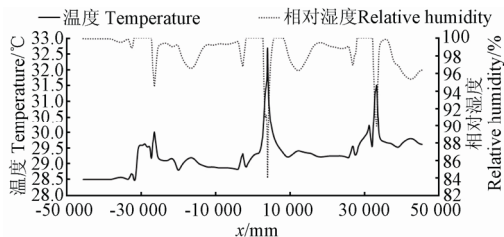


图 3 $z=3\ 000\text{ mm}$ $y=1\ 200\text{ mm}$ 直线上温度和相对湿度

Fig.3 Simulated temperature and relative humidity along line at $z=3\ 000\text{ mm}$, $y=1\ 200\text{ mm}$

2.2 空气相对湿度场的模拟结果

舍内 $z=3\ 000\text{ mm}$ 横向断面空气相对湿度云图如图 4 所示。舍内相对湿度与温度间呈现强烈的耦合关系, 温度低的区域相对湿度较大, 温度高的区域相对湿度较低。除前端外, 舍内高度 2 m 以内的奶牛活动区域的相对湿度都高于上部空间。由图 3 可见, 随着空气的流动, 在牛舍宽度方向上, 相对湿度总体呈现下降趋势, 湿帘出口与风机入口处的相对湿度差为 3.6% , 平均每米舍宽下降 0.04% 。由于奶牛自身散发出一部分的水分, 牛体附近区域相对湿度较高。

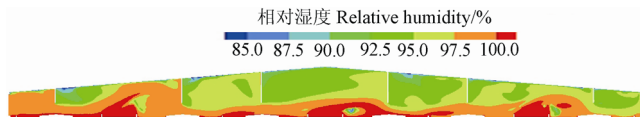


图 4 舍内 $z=3\ 000\text{ mm}$ 截面相对湿度云图

Fig.4 Contours of relative humidity at $z=3\ 000\text{ mm}$ cross section

2.3 LPCV 牛舍内奶牛舒适度分析

温热环境是制约奶牛产奶量的主要因素, 温湿度指数 (temperature-humidity index, THI) 作为温热环境的综合指标被广泛用于评估奶牛产奶量的主要因素^[24]。

温湿指数 (THI) 可按下式计算^[25]:

$$\text{THI} = 0.8T_d + \left(\frac{\text{RH}}{100}\right) \times (T_d - 14.3) + 46.4 \quad (6)$$

式中: T_d 为干球温度, $^\circ\text{C}$; RH 为相对湿度, %。

图 5 为根据测试所得的湿帘入口、中间位置、风机出口 3 个舍内测点及舍外大气环境的温度和相对湿度值计算出的 THI 变化曲线。由图可见, THI 与温度的变化趋势相同, 在一天中大致呈正弦曲线趋势变化; 在空间分布上, 在湿帘正常运行时, 随着空气的流动, 在牛舍宽度方向上 THI 值逐渐增加, 模拟时刻风机入口与湿帘出口之间 THI 的差值为 2.3, 平均每米舍宽提高 0.025, 且舍内各点的 THI 值均小于舍外。19:00—09:00 为夜间湿帘停止运行的时段, 此时, 舍内各处 THI 值均高于舍外且各点的差别不明显。

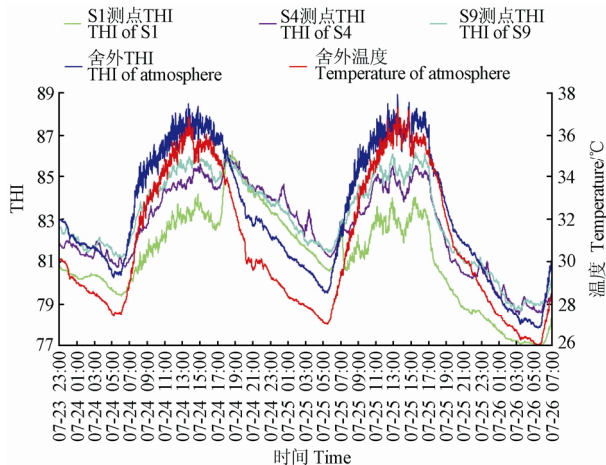


图 5 奶牛舍内外温湿指数 THI 及舍外温度变化曲线

Fig.5 Curve of THI inside & outside of barn and temperature of atmosphere

3 数值模拟结果验证

3.1 温湿度场模拟结果验证

为了验证模拟结果的准确性,将9个测点在2012年7月24日13:30分的测试值与相同位置的模拟值进行了对比,图6为9个测点的温度和相对湿度的测试值与模拟值的对比结果,舍内温度的测试值与模拟值之间的平均相对误差为0.89%,最大相对误差为1.80%;相对湿度的平均相对误差为0.59%,最大相对误差为1.63%,说明数值模拟与现场实测有较好的吻合度。

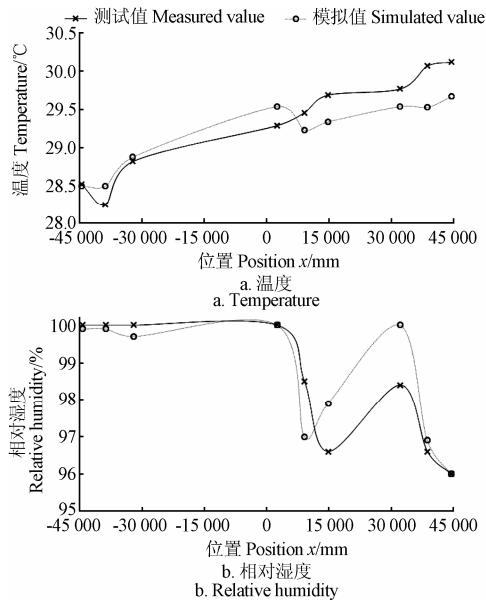


图6 舍内 $z=3000\text{ mm}$ $y=1200\text{ mm}$ 直线上测点温度和相对湿度实测值和模拟值对比

Fig.6 Comparison of measured temperature and relative humidity values with simulated results at $z=3\ 000\text{ mm}$, $y=1\ 200\text{ mm}$ line

3.2 奶牛散热量的验证

奶牛体表散发的热量是舍内热量的主要来源之一,国外学者对奶牛的散热量的研究表明奶牛的总散热量取决于奶牛的质量、生产性能、环境状况等因素^[26-29]。文中奶牛的散热量按下列各式计算^[30]

环境温度为 20°C 时的总散热量:

$$\Phi_{20^\circ\text{C}} = 5.6m^{0.75} + 22Y_1 + 1.6 \times 10^{-5} P^3 \quad (7)$$

环境温度为 $t^\circ\text{C}$ 时的总散热量:

$$\Phi_{\text{tot}} = \Phi_{20^\circ\text{C}} \left(1 + 4 \times 10^{-5} (20 - t)^3 \right) \quad (8)$$

环境温度为 $t^\circ\text{C}$ 时的显热散热量:

$$\Phi_s = 0.71\Phi_{\text{tot}} - 0.408 \times t^2 \quad (9)$$

环境温度为 $t^\circ\text{C}$ 时的潜热散热量:

$$\Phi_l = \Phi_{\text{tot}} - \Phi_s \quad (10)$$

式中: $\Phi_{20^\circ\text{C}}$ 为环境温度为 20°C 时的总散热量, W; Φ_{tot} 为环境温度为 $t^\circ\text{C}$ 时的总散热量, W; Φ_s 为环境温度为 $t^\circ\text{C}$ 时的显热散热量, W; Φ_l 为环境温度为 $t^\circ\text{C}$ 时的潜热散热量, W; m 为奶牛质量, kg; Y_1 为日产奶量, kg; P 怀孕天数, 天; t 为环境温度, $^\circ\text{C}$ 。

根据上面各式,从理论上计算得到当时单头奶牛的

显热散热量为 407 W ,数值模拟计算得到的奶牛散热量为 348 W ,两者之间的相对误差为 14.5% ,误差产生的原因主要有2个方面:影响奶牛产热量的因素很多,在利用公式(7)~(9)计算产热量时存在一定的误差;另一方面奶牛体热向舍内传递的过程也较为复杂,其传热系数受到舍内风速、温度、奶牛体表状况等因素等影响,很难现场实测,本文在模拟时将奶牛体表作为恒温表面处理,数据模拟结果也存在误差。

4 结 论

本文对低屋面横向通风(low profile cross ventilated, LPCV)牛舍内温湿分布进行了三维数值模拟和现场实测。得出以下结论:

1) 中国华东地区的LPCV牛舍,一年中最炎热季节采用湿帘风机降温系统后,舍外空气温度为 36.2°C ,相对湿度为 55.5% 的条件下,舍外空气通过湿帘后温度下降 7.7°C ,但相对湿度达到 99.9% ,舍内处于高温高湿状态。

2) LPCV牛舍内的温度场和相对湿度场受气流场的影响,分布不均匀,相对湿度与温度呈现强烈的耦合关系,风速高的区域温度相对较低。随着空气的流动,沿气流方向奶牛舍内温度每米舍长平均升高 0.014°C 、相对湿度平均下降 0.04% 。

3) LPCV牛舍内部的温湿指数与舍外温度的变化趋势相同。湿帘正常运行时,随着空气的流动,沿气流方向温湿指数THI值逐渐增加,舍内进气端的舒适度优于排气端,平均每米舍宽THI提高 0.025 。

4) 温度、相对湿度的测试值与模拟值之间的相对误差仅为 0.89% 、 0.59% ,模拟值与实测值达到了高度吻合;理论计算所得的奶牛显热散热量与模拟比较,其相对误差为 14.5% 。表明本文所构建的模型及确定的边界条件具有较好的可靠性和合理性。

[参 考 文 献]

- [1] Harner J P, Smith J F, de Haro Marti M, et al. Comprehensive evaluation of a low-profile cross-ventilated freestall barn[C]// Proceeding of the 7th Western Dairy Management Conference. Reno: Western Dairy Management Conference, 2007: 127—147.
- [2] Harner J P, Smith J F, Bradford B J, et al. In the Thermoneutral Zone: Potential Benefits of LPCV Building[C]// Proceeding of the 7th Western Dairy Management Conference. Reno: Western Dairy Management Conference, 2007: 27—41.
- [3] Smith J F, Harner J P, Bradford B J, et al. Opportunities with low profile cross ventilated freestall facilities[C]// Proceeding of the Dairy Housing of the Future-Opportunities with Low Profile Cross Ventilated Housing Conference. Sioux Falls: Kansas State University Research and Extension, 2008: 1—20.
- [4] Harner J P, Smith J F. Low-profile cross-ventilated freestall facilities – A 2 year summary[C]// Proceeding of the 2008 High Plains Dairy Conference. Albuquerque: High Plains Dairy Conference, 2008: 65—78.

- [5] 颜志辉, 施正香, 王朝元, 等. 大跨度横向机械通风奶牛舍环境状况的分析与思考[J]. 中国畜牧杂志, 2012, 48(16): 43—46.
- [6] 李守忠. 低屋面横向通风牛舍(LPCV)[C]// 中国奶业协会年会论文集 2009(上册). 杭州: 2009, 366—368.
- [7] 曹士明, 马满友, 王永红. 大型奶牛养殖场粪污处理系统与泌乳牛舍饲养环境控制新技术的应用[J]. 中国奶牛, 2011(17): 46—49.
- [8] Jiang Guozhen, Hu Yaohua, Liu Yufeng, et al. Analysis on insulation performance of sunken solar greenhouse based on CFD[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(12): 275—281. (in Chinese with English abstract)
- [9] 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 (Transactions of the CSAE), 2014, 30(6): 139—146. (in Chinese with English abstract)
- [10] Kim Keesung, Yoon Jeong-Yeol, Kwon Hyuck-Jin, et al. 3-D CFD analysis of relative humidity distribution in greenhouse with a fog cooling system and refrigerative dehumidifiers[J]. Biosystems Engineering, 2008, 100(2): 245—255.
- [11] Mostafa E, Lee I B, Song S H, et al. Computational fluid dynamics simulation of air temperature distribution inside broiler building fitted with duct ventilation system[J]. Biosystems Engineering, 2012, 112(4): 293—303.
- [12] Seo I H, Lee I B, Moon O K, et al. Modelling of internal environmental conditions in a full-scale commercial pig house containing animals[J]. Biosystems Engineering, 2012, 111(1): 91—106.
- [13] 蒋国振, 胡耀华, 刘玉凤, 等. 基于 CFD 的下沉式日光温室保温性能分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(12): 275—281. Jiang Guozhen, Hu Yaohua, Liu Yufeng, et al. Analysis on insulation performance of sunken solar greenhouse based on CFD[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(12): 275—281. (in Chinese with English abstract)
- [14] 程秀花, 毛罕平, 伍德林, 等. 玻璃温室自然通风热环境时空分布数值模拟[J]. 农业机械学报, 2009, 40(6): 179—183. Cheng Xiuhua, Mao Hanping, Wu Delin, et al. Numerical simulation of thermal profiles in spatial and temporal field for natural ventilated glasshouse[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(6): 179—183. (in Chinese with English abstract)
- [15] 胥芳, 张立彬, 陈教科, 等. 玻璃温室小气候温湿度动态模型的建立与仿真[J]. 农业机械学报, 2005, 36(11): 102—105, 131. Xu Fang, Zhang Libin, Chen Jiaoliao, et al. Modeling and simulation of subtropical greenhouse microclimate in China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(11): 102—105, 131. (in Chinese with English abstract)
- [16] 程秀花, 毛罕平, 倪军. 温室环境-作物湿热系统 CFD 模型构建与预测[J]. 农业机械学报, 2011, 42(2): 173—179. Cheng Xiuhua, Mao Hanping, Ni Jun. Numerical prediction and CFD modeling of relative humidity and temperature for greenhouse-crops system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(2): 173—179. (in Chinese with English abstract)
- [17] 王小超, 陈昭辉, 王美芝, 等. 冬季猪舍热回收换气系统供暖的数值模拟[J]. 农业工程学报, 2011, 27(12): 227—233. Wang Xiaochao, Chen Zhaohui, Wang Meizhi, et al. Numerical simulation of heat supply for heat recovery ventilation system of piggery in winter[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(12): 227—233. (in Chinese with English abstract)
- [18] 贺城, 牛智有, 齐德生. 猪舍温度场和气流场的 CFD 模拟比较分析[J]. 湖北农业科学, 2010, 49(1): 134—136. He Cheng, Niu Zhiyou, Qi Desheng. CFD simulation and comparative analysis about air temperature and airflow in the piggery[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2010, 49(1): 134—136. (in Chinese with English abstract)
- [19] 佟国红, 张国强, Morsing S, 等. 猪舍内气流变化的模拟研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2007, 38(3): 379—382. Tong Guohong, Zhang Guoqiang, Morsing S, et al. Airflow simulation in a scale model of the swine building[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2007, 38(3): 379—382. (in Chinese with English abstract)
- [20] 颜培实, 李如治. 家畜环境卫生学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011: 50—52.
- [21] 李先庭, 李晓峰, 彦启森. 一种求解湿空气温度和相对湿度的 CFD 算法[J]. 暖通空调, 2000, 30(2): 66—68. Li Xianting, Li Xiaofeng, Yan Qisen. CFD algorithm for wet air temperature and relative humidity calculation[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2000, 30(2): 66—68. (in Chinese with English abstract)
- [22] 王福军. 计算流体力学分析-CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 7—11.
- [23] 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: 240—243.
- [24] 唐家鹏. FLUENT 14.0 超级学习手册[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2013: 196—197.
- [25] 薛白, 王之盛, 李胜利, 等. 温湿度指数与奶牛生产性能的关系[J]. 中国畜牧兽医, 2010, 37(3): 153—157. Xue Bai, Wang Zhisheng, Li Shengli, et al. Temperature-humidity index on performance of cows[J]. China Animal Husbandry & Veterinary Medicine, 2010, 37(3): 153—157. (in Chinese with English abstract)
- [26] Panagakakis P, Blanes-Visal V, Banhazi T, et al. Glossary of terms on animal housing: Interconnecting Engineering, physical and physiological definitions[J]. Interconnecting Engineering International: The CIGR Ejournal, 2009, 6: 1—34.

- [27] Khan Zahid A, Badruddin Irfan Anjum, Quadir G A, et al. A quick and accurate estimation of heat losses from a cow[J]. *Biosystems Engineering*, 2006, 93(3): 313—323.
- [28] Da Silva Roberto Gomes, Maia Alex Sandro Campos, de Macedo Costa Leonardo Lelis, et al. Latent heat loss of dairy cows in an equatorial semi-arid environment[J]. *International Journal of Biometeorology*, 2012, 56(5): 927—932.
- [29] Campos Maia Alex Sandro, Gomes DaSilva Roberto, Battiston Loureiro Cintia Maria. Respiratory heat loss of Holstein cows in a tropical environment[J]. *International Journal of Biometeorology*, 2005, 49(5): 332—336.
- [30] Sakatani Miki, Balboula Ahmed Z, Yamanaka Kenichi, et al. Effect of summer heat environment on body temperature, estrous cycles and blood antioxidant levels in Japanese Black cow[J]. *Animal Science Journal*, 2012, 83(5): 394—402.
- [31] Pedersen S, Sallvik K. Forth report of working group on climatization of animal houses: Heat and moisture production at animal and house levels[R]. Horsens: Danish Institute of Agricultural Sciences, 2002.

CFD simulation of temperature and humidity distribution in low profile cross ventilated dairy cattle barn

Deng Shuhui^{1,2}, Shi Zhengxiang^{1*}, Li Baoming¹

(1. Key Laboratory of Agricultural Engineering in Structure and Environment, Ministry of Agriculture, College of Water Resource and Civil Engineer, China Agricultural University, Beijing 100083, China;
2. College of Engineering, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China)

Abstract: With the ever increasing scale and intensivism in pasture in China, low profile cross ventilated (LPCV) dairy cattle barn, as a main building style in cattle house, is increasingly applied. The most obvious benefit of LPCV building is the ability to control the cow's environment during all seasons of the year. It increases the percentage of time cows are in the thermal neutral zone, which allows both milk production and feed efficiency to be increased. However, during the hottest period in eastern China, the hot and humid climate, reduces the control effectiveness inside the building. In order to understand temperature and humidity distribution inside, the field experiment, which measured the parameters including environment temperature, humidity and surface temperature of dairy cattle, was conducted. The experimental dairy houses were located in the east part of China, with the demotions of length 376.6 m×width 90.4 m, and a slop roof of 1/12.5 pitch. Measured results showed that in the LPCV cattle house in eastern China, when the outdoor temperature and relative humidity were 36.2℃ and 55.5% respectively, the wet pad system could cool the air with a decline of up to 7.7℃, but increase the relative humidity to 99.9%, which led to a high temperature and high moisture condition. Meanwhile, three-dimension computational fluid dynamics (CFD) method was carried out to simulate thermal condition inside the cattle building. Multiple parameters of cattle were included in the CFD model to effectively express the heat and moisture released from cattle bodies as well as provide more realistic air flow patterns. In order to save the computer resource, a model of simplified cattle was considered to reduce the number of meshes with the legs and tails in the original. The temperature of the surface of cattle and building was measured by thermal camera in the field experiment. Multi-phase transport model was adopted to calculate the moisture generation. Simulated results showed that the indoor temperature and humidity were influenced by fluent field and unevenly distributed. Low temperature was found in place that had high air velocity, and humidity was significantly coupled with temperature variation. With the air movement, temperature increased by 0.014℃ while humidity decreased by 0.04% per meter in width dimension. Temperature-humidity index (THI) was applied to analyze and estimate environment comfort in different locations inside the cattle building. The THI had a same tendency with the change of environment outdoors. When the wet pad worked properly, THI increased in width dimension. Inlet position had a better thermal condition than outlet position, and THI increased by 0.025 per meter in this dimension (width dimension). The CFD model was validated via the comparison with the field experimental results at the same locations where the temperature and relative humidity sensors were installed. Comparison between simulations and measurements showed that the average relative error between simulated and measured results in temperature and humidity were 0.89% and 0.59%, respectively. Theoretical heat generation of dairy cow was calculated, and the discrepancy between calculated and simulated values was 14.5%. The high agreement in simulation and measurement proved the reliability and feasibility of the model and boundary condition in the simulation. And this study can provide references for the optimization design and environment regulation of LPCV dairy cattle barn in China.

Key words: computational fluid dynamics; temperature; humidity control; low profile cross ventilated; dairy cattle barns; numerical simulation