

密闭式平养鸡舍纵向通风的数值模拟

李文良^{1,2} 施正香^{1,2} 王朝元^{1,2}

(1. 中国农业大学 水利与土木工程学院, 北京 100083; 2. 农业部设施农业生物环境工程重点开放实验室, 北京 100083)

摘要 利用计算流体动力学软件 Fluent,采用湍流 Realizable $k-\epsilon$ 模型,对密闭式平养鸡舍矩形进风口风门开启角度、安装高度和进风风速对舍内气流分布的影响进行模拟分析。结果表明:风门开启角度 $> 0^\circ$ 时,舍内气流分布均匀性较 $= 0^\circ$ 时有所提高,鸡体水平高度处(距地面 0.40 m)的风速随 θ 的增大而增大;在低温季节,为满足鸡体水平高度处风速不大于 0.3 m/s(适宜风速)的要求,风门开启角度和最大进风风速的组合可选择为 $0^\circ/3.0$ m/s, $15^\circ/1.5$ m/s, $30^\circ/1.0$ m/s 和 $45^\circ/1.0$ m/s;进风口距顶棚的距离越小,越易形成贴附射流,而 θ 对贴附射流形成的影响取决于进风口安装高度,因而设计时选择 θ 与进风口安装高度的合适组合,有利于进入舍内的冷空气与舍内热空气的混合。

关键词 平养鸡舍;纵向通风;矩形进风口;数值模拟;CFD

中图分类号 S831.4

文章编号 1007-4333(2007)06-0080-05

文献标识码 A

Numerical simulation of tunnel ventilation system of plane-raising enclosed henhouse

Li Wenliang^{1,2}, Shi Zhengxiang^{1,2}, Wang Chaoyuan^{1,2}

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. Key Laboratory of Agricultural Bio-Environmental Engineering, Ministry of Agriculture, Beijing 100083, China)

Abstract In this paper, numerical simulation was conducted to analyze the effects of the angle and installation height of the guide plate and air velocity at the inlet on air flow inside the enclosed henhouse. Computational Fluid Dynamics software, Fluent, with turbulent Realizable mode during the calculation was used in this study. The simulation results showed that the uniformity of air distribution inside the henhouse was improved with the guide plate angle more than 0° . The air velocity at the height of the poultries (0.40 m above the ground) increased with the rise of the guide plate angle. In low temperature seasons, to ensure that the air velocity at the height of poultries will not exceed 0.3 m/s the following combinations of guide plate angles and inlet velocities were recommended: 0° with 3.0 m/s, 15° with 1.5 m/s, 30° with 1.0 m/s and 45° with 1.0 m/s, respectively. The shorter distance between the air inlet and the ceiling will form a wall-jet, which is helpful to mix the incoming colder air with the air inside the henhouse. The influence of θ on the uniformity of the air inside the henhouse depends on the air inlet height. The combination of θ and the air inlet height would increase the air mixing inside the henhouse.

Key words plane-raising henhouse; tunnel ventilation; rectangle air-inlet; numerical simulation; CFD

通风是密闭式鸡舍舍内环境调控的重要技术手段,良好的通风对改善舍内热环境条件和空气质量,提高鸡的健康和生产水平有重要作用^[1]。进风口的结构和设置对畜舍内小气候环境、气流分布均匀性,

及能量损耗等有很大影响^[2]。进风口的形状(圆形、矩形或条形)、配置(如进风口是否有风罩)、位置(如条形进风口的位置在单侧墙、双侧墙或屋脊)以及进风口风门的开启角度都会对舍内气流的分布产生较

收稿日期: 2007-05-21

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划课题(2006BAD14B01, 2006BAK04A03);北京市教育委员会共建项目建设计划资助(XK100190650)

作者简介: 李文良, 硕士研究生;施正香, 教授, 通讯作者, 主要从事畜禽环境工程研究, E-mail: shizhx@cau.edu.cn

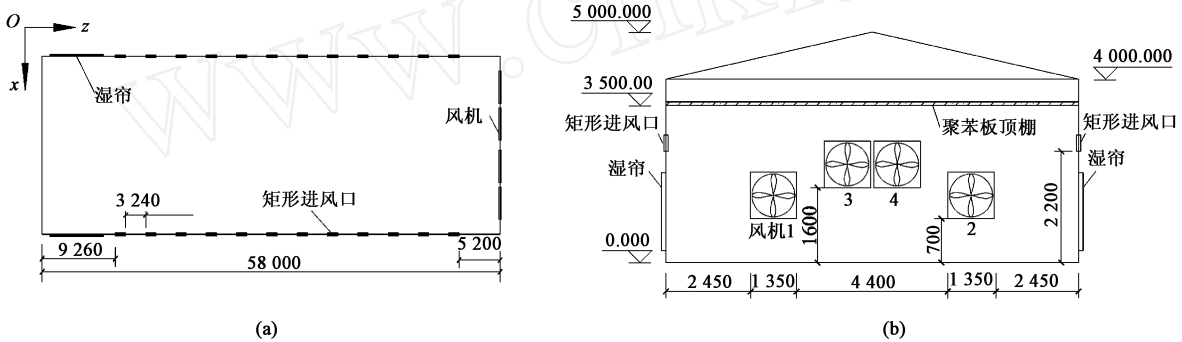
大影响^[3-8]。此外,进风面积一定时,进风口尺寸、数量不同,畜舍内气流分布也不同^[9]。

计算流体动力学 (computational fluid dynamics, CFD) 方法具有经济、快速,且能直观地预测建筑物内全部气流场、温度场、压力和污染物浓度等优点,近年来随着计算机技术的快速发展,该方法逐渐应用于畜舍通风的研究中。目前,CFD 方法在猪舍、牛舍通风系统的研究中得到了很好的应用^[8,10],但很少将其应用于密闭式鸡舍的纵向通风研究中。与猪、牛等相比,鸡对气流的变化更为敏感,特别是在低温季节,过大或过小的风速都会对其造成很大影响。如何为密闭式鸡舍提供良好的通风系统,实现既能满足舍内良好的空气质量和热环境条件,又尽可能地节能,是密闭式鸡舍环境调控的关键之一。本研究采用 CFD 模拟方法,选择华北地区双侧墙安

装矩形进风口的典型密闭式纵向通风鸡舍,就鸡舍进风口风门开启角度、进风口安装高度以及进风口风速对舍内气流分布的影响进行模拟分析,以期为密闭式平养鸡舍通风系统的设计提供理论参考。

1 模拟采用的典型鸡舍及矩形进风口

密闭式鸡舍,饲养方式为地面厚垫草平养,鸡体水平高度处距地面 0.40 m。鸡舍长 58.00 m,宽 12.00 m,舍内净高 3.50 m,纵向通风。共配置 4 个风机(9H1250);侧墙安装矩形进风口,两侧各 12 个,相邻进风口间距 3.24 m,安装高度 2.20 m(图 1)。选择矩形进风口 65 cm × 13 cm × 18 cm,模拟时仅考虑有效进风空间,进风口示意图、剖面图见图 2,其中为风门开启角度,0° ~ 60° (= 60 时进风口为关闭状态)。



入口端左侧墙角为原点 *O*,鸡舍跨度方向为 *x* 轴,鸡舍长度方向为 *z* 轴;单位:mm,下同。

图 1 鸡舍平面(a)及剖面(b)示意图

Fig. 1 Layout (a) and cross section (b) of henhouse

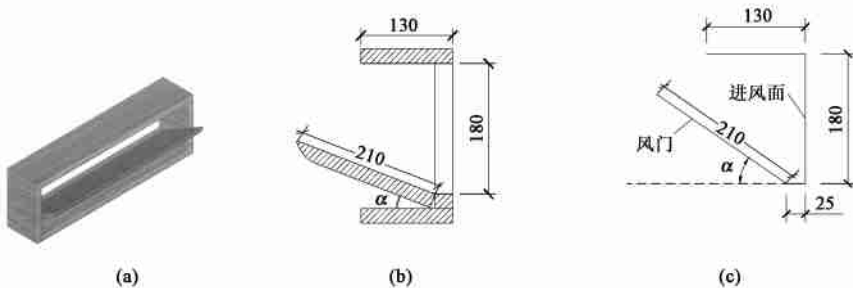


图 2 进风口示意图(a)、剖面图(b)及剖面简化图(c)

Fig. 2 Model (a) and cross section (b) and simplified cross section (c) of air-inlet

2 控制方程、网格划分及边界条件

1) 控制方程。研究等温条件下鸡舍舍内空气的流动情况。根据舍内空气流动特性,将舍内空气流动视为定常和不可压缩的湍流,控制方程为连续方程和动量方程,表述为^[11]:连续方程

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

动量方程

$$\frac{\partial (u_i u_i)}{\partial x_j} = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + g_i \tag{2}$$

式中: u 为空气流速, m/s ; ρ 为空气密度, kg/m^3 ; P 为静压, Pa ; μ 为动力黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; g 为重力加速度, $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s}^2)$ 。数值模拟时, 选用的湍流模型为 Realizable k - ϵ 模型, 其对应的湍动能 k 和耗散率的输运方程^[12] 分别为

$$\frac{\partial k u_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \epsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{k} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right] + \left[c_1 S - c_2 \frac{u_i u_j}{k + \sqrt{k}} \right] \quad (4)$$

式中: μ_t 为湍动黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; P_k 为速度梯度引起的压力生成项, $P_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$; S 为时均应变张量, $S = \sqrt{2 S_{i,j} S_{i,j}}$, $S_{i,j} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$; 为运动黏度, m^2/s ; 经验常数 $c_1 = 1.9$ 、 $c_2 = 1.0$ 、 $\epsilon = 1.2$ 。

2) 网格划分。利用 Fluent 的前处理软件 Gambit, 选择混合网格类型, 采用混合单元进行网格划分。网格划分时, 对进风口区域单独划分, 网格间隔设为 2 cm , 其余空间间隔为 30 cm 。

3) 边界条件。进风口采用速度进风口边界条件, 其湍流参数 k 和 ϵ 的设定^[10] 为: $k = 3 \left(\frac{\bar{u}}{I} \right)^2 / 2$, 式中 \bar{u} 为进风口的平均风速, I 为湍流强度; $\epsilon = C_\mu^{3/4} k^{3/2} / 0.07L$, C_μ 取 0.09 , L 为关联尺寸, 对于充分发展的湍流, 可取 L 等于水力直径。排风口使用自由出流边界条件。壁面使用无滑移绝热壁面边界条件。

3 结果与分析

3.1 进风口风门开启角度对舍内气流分布的影响

本研究选取进风口风门开启角度分别为 0° 、 15° 、 30° 和 45° , 就对舍内气流分布的影响进行模拟分析。假设进风风速 1.0 m/s , 3、4 风机 (图 1) 关闭, 1、2 风机为排风口。

图 3 示出不同风门开启角度下鸡体水平高度 (0.40 m) 处风速沿鸡舍纵向 z 的变化情况。可见, 鸡体水平高度处的风速随着风门开启角度的增大而增大。当 $\alpha = 0^\circ$, 进风风速为 1.0 m/s 时, 鸡体水平高度 0.40 m 处的风速沿 z 向逐渐增大; 当 $\alpha = 15^\circ$ 、 30° 、 45° 时, 风速在鸡舍纵向较短的区域内较快速增大, 随后趋于相对稳定; 与 $\alpha = 0^\circ$ 时相比, 此区域内鸡体水平高度处风速较大, 且分布均匀性有所提高。

图 4 示出进风口安装高度 2.20 m 时, 不同开启

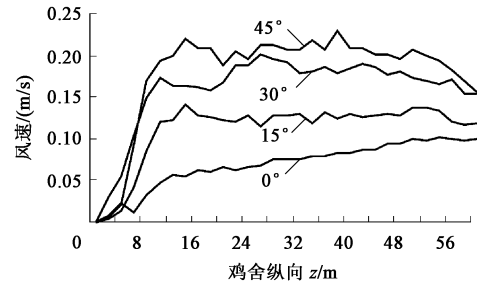


图 3 不同风门开启角度下鸡舍内 0.40 m 高度处风速沿纵向 z 的变化

Fig. 3 Variations of simulated air velocities along portrait of henhouse at 0.40 m height with different angles of guide plate

角度下舍内沿 z 方向 29.00 m 处 (鸡舍中间部位) 横断面上的气流分布情况。横断面上出现了不同风速的 3 个区域, 即射流区、回流区和漩涡区, 其中射流区风速最大, 漩涡区的风速最小。在漩涡区内, 空气不能随气流及时排出, 易造成粉尘等污染物在此聚集。此外, 由于漩涡的影响, 两侧墙附近的区域风速较小, 形成滞留区。而当开启角度增大时, 在一定程度上, 使得进入舍内的气流速度增大, 对舍内气流的扰动随之增大, 加大了回流速度, 最终导致鸡体水平高度处风速增大。

$\alpha = 0^\circ$ 时, 由于紊流的脉动和卷吸作用, 进入舍内的气流仅能形成非贴附射流。随着射流边界的加宽和流量的增大, 风速越来越小, 从而在射流下方形成回流 (图 4(a))。当 $\alpha > 15^\circ$ 时, 由于风门的作用, 进入舍内的气流方向发生改变, 在气流到达顶棚时形成贴附射流, 射流射程增加; 由于射流卷吸作用使得射流下方形成明显漩涡 (图 4(b) ~ (d))。这表明风门开启角度有利于贴附射流形成, 增加射流的射程, 有利于冷空气和舍内空气的混合。不同开启角度射流发展为贴附射流的过程有一定差异, 开启角越小, 形成贴附射流前的未贴附段越长, 到达顶棚时射流的边界宽度越大, 风速也越小, 回流速度也有所减小; $\alpha = 45^\circ$ 时, 几乎直接形成贴附射流。

3.2 进风风速对鸡体水平高度处风速的影响

通常, 进风风速对舍内风速有很大影响, 实际生产中可通过调节风门开启角度、风机功率获得舍内相对适宜的风速。低温季节鸡舍内比较适宜的风速为鸡体周围风速不超过 0.3 m/s ^[13], 本研究以此为目标, 选择风门开启角度和进风口风速的不同组合, 进行数值模拟, 以期在鸡体水平高度 0.40 m 处获得适宜的风速。结果表明: 当 $\alpha = 0^\circ$ 、进风风速为

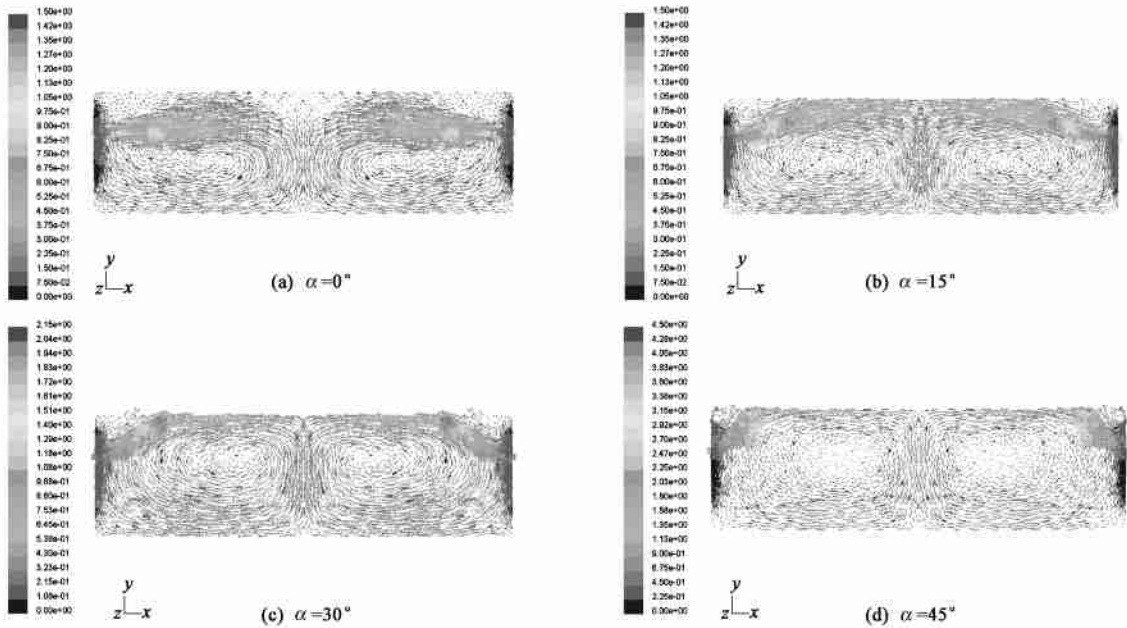


图 4 $u = 1.0 \text{ m/s}$ 时不同风门开启角度下 $z = 29.00 \text{ m}$ 处横截面上的速度分布

Fig. 4 Velocity distribution at $z = 29.00 \text{ m}$ with $u = 1.0 \text{ m/s}$ and different angles of guide plate

3.0 m/s, 或 $\alpha = 15^\circ$ 风速 1.5 m/s, 以及 $\alpha = 30^\circ$ 和 $\alpha = 45^\circ$ 风速 1.0 m/s 时, 均可在鸡体水平高度 0.40 m 处获得不超过 0.3 m/s 的风速。由此可以推断, 当风速较大或舍内风机功率较大时, 应尽可能保持较小的风门开启角度, 当 $30^\circ < \alpha < 45^\circ$ 时, 风速不宜大于 1.0 m/s, 从而避免舍内风速过大造成鸡体的不适。

3.3 进风口安装高度对舍内气流分布的影响

本研究对 3 种风口安装高度, 即 2.20 m (风口顶

端距顶棚 1.12 m)、2.82 m (距顶棚 0.50 m) 和 3.32 m (距顶棚 0 m) 时的流场进行模拟分析。模拟时假定进风风速 1.0 m/s, 3、4 风机关闭, 1、2 风机为排风口。

一般地, 气流进入舍内形成贴附射流, 能够避免冷空气过早的流向鸡只, 有利于冷空气与鸡舍上部热空气的混合。由图 5 可以看出, 进风口安装高度为 2.82 m 时, 任何风门开启角度下, 两侧气流进入舍内经过发展后都能到达顶棚形成贴附射流, 气流贴

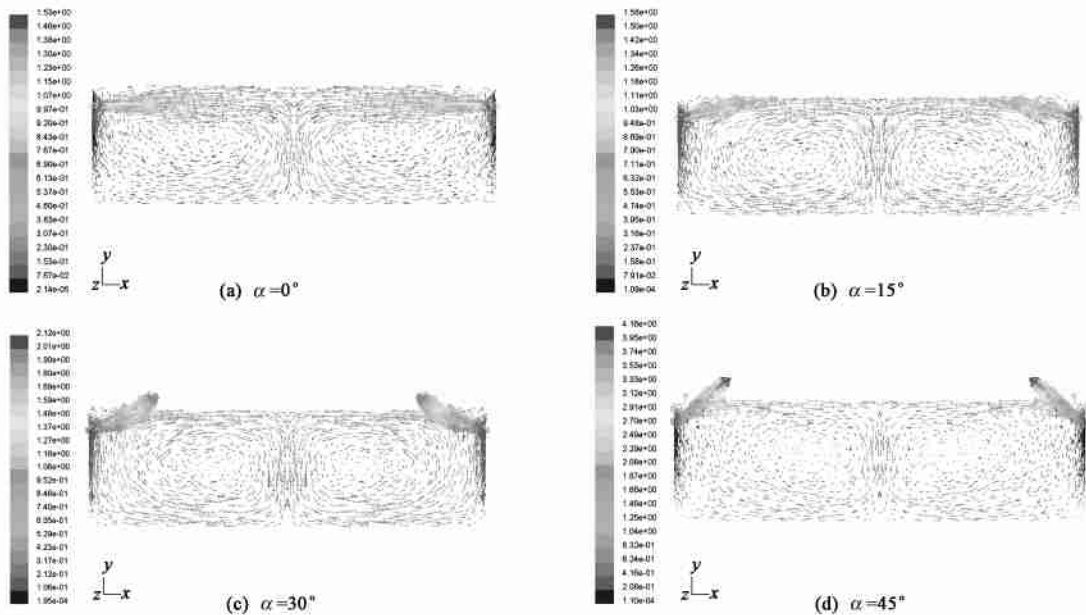


图 5 风口安装高度为 2.82 m 时不同风门开启角度下 $z = 29.00 \text{ m}$ 处横截面上的速度分布

Fig. 5 Velocity distribution at $z = 29.00 \text{ m}$ with air-inlet height 2.82 m and different angles of guide plate

附在顶棚流动到鸡舍中部下沉形成回流。当进风口贴近顶棚安装时,两侧气流进入舍内后直接形成贴附射流,气流经过发展在顶棚中部相遇,在射流卷吸作用下一起下沉形成回流。而当安装高度为2.20 m, $\alpha = 0^\circ$ 时则无法形成贴附射流,只有当风门开启角度 $\alpha > 0^\circ$ 才可能形成贴附射流。

此外,不同的风门开启角度因进风口安装高度不同,形成的射流宽度有一定差异。相对而言,开启角度较小时形成的射流宽度相对较大;进风口安装高度越接近顶棚,射流的宽度越窄,这使得射流速度及舍内空气扰动、回流速度均有所增大,不利于冷、热空气的充分混合,导致风门开启角度的作用不能得到有效体现。

4 结 论

1) 进风口风门开启角度增大,舍内气流分布均匀性提高;在相同进风风速条件下,鸡体水平高度的风速随进风口风门开启角度的增大而增大。

2) 要使鸡体水平高度的风速不超过0.3 m/s,进风口风门开启角度 $\alpha = 0^\circ$ 时进风风速不宜大于3.0 m/s, $\alpha = 15^\circ$ 时进风风速不宜大于1.5 m/s, α 为30和45时不宜大于1.0 m/s。

3) 进风口风门开启角度、风口安装高度对气流进入舍内贴附射流的形成以及冷、热空气的混合程度有很大影响。当安装高度为2.20 m时,若风门开启角度 $\alpha = 0^\circ$,则无法形成贴附射流;若安装高度超过2.82 m,则任何开启角度气流都能经过发展(或直接)形成贴附射流;进风口安装位置接近顶棚,容易造成射流速度、舍内空气扰动及回流速度的增大,不利于冷、热空气的充分混合,从而使得风门开启角度的作用不能得到有效的体现。

参 考 文 献

- [1] 马承伟,苗香雯. 农业生物环境工程[M]. 北京:中国农业大学出版社,2005
- [2] 俞宏军,施正香,李保明,等. 鸡舍有组织通风的侧挡导流式活动进风口[J]. 中国农业大学学报,1997,2(4):84-88
- [3] Albright L D. Airflow through hinged baffle slotted inlets[J]. Journal of Agricultural Engineering Research,1976,19(4):728-732
- [4] Timmons M B. Use of physical models to predict the fluid motion in slot-ventilated livestock structures[J]. Transactions of the ASAE,1984,27(2):502-507
- [5] Jin Y,Ogilvie J R. Airflow characteristics in the floor region of a slot ventilated room(isothermal)[J]. Transactions of the ASAE,1992,35(2):695-702
- [6] Zhang G, Ström J S. Jet drop models for control of non-isothermal free jets in a side-wall multi-inlet ventilation system[J]. Transactions of the ASAE,1999,42(4):1121-1126
- [7] Oberreuter M E, Hoff S J. Quantifying factors affecting sidewall air inlet performance[J]. Transactions of the ASAE,2000,43(3):707-716
- [8] Gebremedhin K G, Wu B. Simulation of flow field of a ventilated and occupied animal space with different inlet and outlet conditions[J]. Journal of Thermal Biology,2005,30:343-353
- [9] Bjerg B, Svidt K, Zhang G, et al. Numerical simulation of airflow in a room with multiple wall inlets[C]//Stowell R R, Bucklin R, Bottcher R W, eds. Livestock Environment VI: Proceedings of the 6th International Symposium. St Joseph MI:ASAE,2001:285-292
- [10] Sun H, Stowell R R, Keener H M, et al. Two-dimensional computational fluid dynamics(CFD) modeling of air velocity and ammonia distribution in a High-Rise Hog Building[J]. Transactions of the ASAE,2002,45(2):1559-1568
- [11] 马宗虎. BSL-3 实验室气流组织状况的数值模拟研究[D]. 北京:中国农业大学,2006
- [12] 黎耀军. 水翼动力学特性与轴流泵水力性能优化研究[D]. 北京:中国农业大学,2006
- [13] Timmons M B. Tunnel ventilation needs proper design procedures[J]. Poultry International,1991(5):52-58