

# 基于 CFD 的开放式牛舍扰流风机安装参数优化\*

邓书辉<sup>1,2</sup> 施正香<sup>1</sup> 范淋佳<sup>1</sup> 丁涛<sup>1</sup>

(1. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083; 2. 黑龙江八一农垦大学工程学院, 大庆 163319)

**摘要:** 为了确定开放式牛舍中扰流风机的安装参数, 在对天津市某开放式牛舍气流场实测的基础上, 建立了风机不同安装参数间组合的 16 个几何模型, 对牛舍内的气流场进行了三维稳态模拟。以扰流风机安装高度和倾角为影响因素, 以距地面 1.0 m 和 1.5 m 高度平面上风速大于 1.0 m/s 区域面积的百分比为评价指标, 分析了风机安装参数对扰流效果的影响。结果表明, 在风机倾角相同时, 安装高度对扰流效果的影响没有显著差异 ( $P > 0.05$ ); 风机最佳的倾角为: 卧栏上方的风机为  $20^\circ$ 、颈枷上方风机为  $10^\circ$ 。

**关键词:** 奶牛舍 扰流风机 计算流体力学 数值模拟 参数优化

**中图分类号:** S817.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)12-0269-06

## Optimization of Installation Parameters of Mixing Fans in Open Dairy Cow House Based on CFD

Deng Shuhui<sup>1,2</sup> Shi Zhengxiang<sup>1</sup> Fan Linjia<sup>1</sup> Ding Tao<sup>1</sup>

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

2. College of Engineering, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China)

**Abstract:** In order to determine the installation parameters of mixing fans in open dairy cow house, field experiment was conducted to measure airflows in dairy cow house in Tianjin. After establishing 16 geometric model with different installation parameters of mixing fans, 3-D steady simulation of airflow distributions was carried out in cow house. The effect of air flow disturbances was analyzed with fans installation height and tilt angle as influence factors and the ratio of the area where air velocity more than 1.0 m/s to total region in two surfaces which above the ground 1.0 m and 1.5 m as evaluation indexes. The result showed that there was no significant difference on effect of air flow disturbance between different installation height ( $P > 0.05$ ) in the same tilt angle. The optimal tilt angles of fans were that fans over the cow bed of  $20^\circ$  and fans over the head gate assembly of  $10^\circ$ .

**Key words:** Dairy-cow house Mixing fans Computational fluid dynamics Numerical simulation Parameters optimization

### 引言

奶牛的产奶性能主要受环境和营养因素的制约, 随着我国奶牛的标准化规模养殖的持续推进, 奶牛舍的环境调控技术越来越引起奶牛养殖者和牛舍

设计人员的重视。我国很多地区在夏季日最高温度经常超过  $30^\circ\text{C}$ , 极端最高温度达  $40^\circ\text{C}$ , 热应激会导致产奶量下降并使奶牛乳成分受到影响。气流主要影响家畜的对流散热和蒸发散热, 其影响程度因气流速度、温度和湿度而不同。在高温时, 只要气流温

收稿日期: 2013-06-13 修回日期: 2013-07-08

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

作者简介: 邓书辉, 博士生, 黑龙江八一农垦大学副教授, 主要从事设施养殖过程控制与环境研究, E-mail: dsh@cau.edu.cn

通讯作者: 施正香, 教授, 主要从事畜禽养殖工艺与环境研究, E-mail: shizhx@cau.edu.cn

度低于皮温,提高气流速度有利于对流散热。一般风速与蒸发散热量呈正比<sup>[1]</sup>。

开放式牛舍是我国各地普通采用的一种牛舍建筑形式,棚舍顶棚起遮阳减少太阳辐射的作用,四周完全打开,增加了舍内的空气流通<sup>[2]</sup>。为了增加开放式牛舍夏季的降温效果,常常在牛舍内安装扰流风机以增加牛体周围的风速,从而加强牛体表面对流散热,起到辅助降温的作用。国外有学者对扰流风机的安装参数进行了相关研究<sup>[3]</sup>,而针对我国开放式牛舍建筑形式和国产风机性能参数的扰流风机安装方法的研究还未见报道。

计算流体力学(Computational fluid dynamic, CFD)是建立在经典流体力学与数值计算方法基础之上的一门独立学科,通过计算机数值计算和图像显示方法,在时间和空间上定量描述流场数值解,从而达到对物理问题研究的目的<sup>[4]</sup>。CFD在畜禽舍环境调控应用方面,国外开展得相对较早,已经得到了很多非常有价值的经验<sup>[5-10]</sup>,国内将CFD应用到畜舍中的研究起步较晚,但也取得了一定的进展<sup>[11-16]</sup>。国内外的研究表明,CFD模拟是研究畜禽舍温、湿度场和空气流场的一个重要手段。

本文应用CFD方法,模拟扰流风机安装高度和角度对扰流效果的影响,找到最佳的风机安装参数,并利用现场实测数据对模拟结果进行验证,为开放式牛舍扰流风机的设计和安装提供技术支持。

## 1 现场与实验室测试

### 1.1 试验牛舍

试验牛舍位于国家奶牛产业技术体系天津市武清综合试验站,为带有钟楼的开放式牛舍,舍长162 m,宽27 m,脊高9.2 m,檐口高3.9 m。牛舍南北朝向,建筑形式为轻型钢结构,北侧设有高为1.6 m矮砖墙,南侧矮墙高度为0.2 m,矮墙上部为单层卷帘,卷帘夏季卷起,东西两侧卧栏位置各设有两块宽度为4.8 m的单层彩钢挡风板,高度与檐口平齐,屋面和东西侧檐口以上脊墙为100 mm玻璃丝棉彩钢夹芯板,其余全部敞开。舍内卧栏和颈枷上方装有4列扰流风机,共36台,风机型号为Fanzic TFP-H100T,风量20 500 m<sup>3</sup>/h。风机安装高度(风机中心距离地面)为3.0 m,安装角度(风机轴线与水平线间夹角)在0°~30°范围内可调,首端风机距东山墙6 m,尾端距西山墙12 m,间距为12 m和18 m,风机平面布置如图1所示。

牛舍采用1条饲喂通道、2列自锁式颈枷、2列头对头卧栏和4条清粪通道的工艺模式,刮粪板自

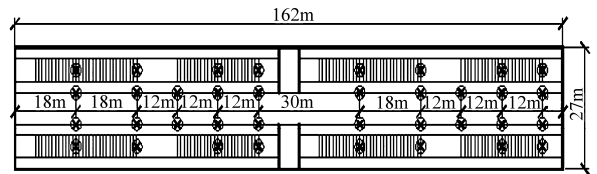


图1 扰流风机平面布置图

Fig.1 Layout of mixing fans in dairy cow house

动清粪。测试期间舍内北侧饲养泌乳牛100头,南侧饲养后备牛187头。

### 1.2 现场测试

2012年7~8月对试验牛舍的环境参数进行了现场测试,包括舍内温度、相对湿度和气流速度。风速采用STF30型风速变送器测量并输出信号,由Agilent 34970A型数据采集仪自动采集记录,风速变送器的量程为0~10 m/s,精度为 $\pm(0.2+0.03)$  m/s,数据采集间隔为1 min。风速测点距离地面分别为1.0 m和1.5 m,水平位置为不同风机作用范围内距离风机中轴线0.5、1.0、1.2和1.5 m处,单台风机的测点位置如图2所示。

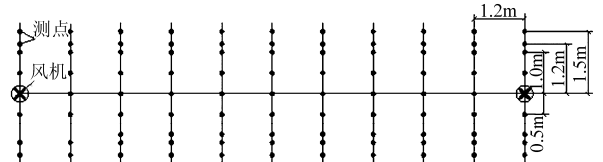


图2 牛舍内风速测点分布图

Fig.2 Position distribution of air velocity measurement points in cow house

### 1.3 风机性能实验室测定

在进行数值模拟时,风机性能参数的正确输入对模拟结果的准确性至关重要,因此需要对牛舍所安装的风机和模拟对比所用风机进行实验室性能测试,回归出风机的性能曲线,按照数值模拟软件要求,作为风机的边界条件。

测试设备采用中国农业大学农业部设施农业工程重点开放实验室按照国际标准ANSI/AMCA 210-99和ANSI/ASHRAE 51-1999,以及我国相关标准建立的一套农业设施通风设备性能测试试验装置。该套试验装置的最大风量为60 000 m<sup>3</sup>/h,额定功率为37 kW,采用变频直流方式进行调速,转速范围为30~1 500 r/min。试验装置能够检验测试通风设备在各种静压条件下的风量、电流、电压、功率以及其他技术参数,测试装置如图3所示。

利用上述设备对牛舍安装的风机和另外两台产自山东和天津的国产风机进行了试验测试,根据实测值拟合得到风机静压与风速的关系曲线,关系式的系数作为风扇边界条件压力跃升多项式的系数。

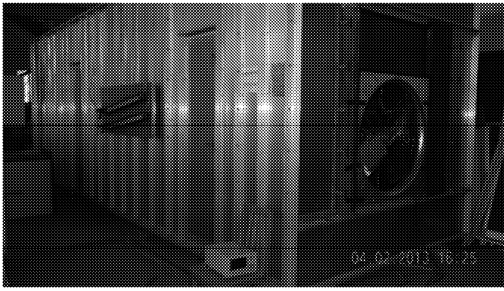


图 3 风机性能测试装置

Fig. 3 Test device of fan performance

## 2 数值模拟

### 2.1 几何模型

牛舍内扰流风机多数都安装在立柱上,牛舍在开间方向上立柱间距一般为 6 m,在模拟时风机间距选取 2 倍的柱距。在牛舍建筑原型基础上,分别建立了风机中心距地面高度 2.6、2.8、3.0、3.2 m,安装角度为 5°、10°、20°、30°之间不同组合的 16 个几何模型。在对比风机各种安装参数下的气流扰动效果时,不考虑热压和风压引起的自然通风影响,为了简化模型,略去了原型中的钟楼部分。模型在宽度方向上采用与原型相同的尺寸,为了减少网格数量,适当缩减了长度方向的尺寸,每一种模型都模拟了 4 排、4 列扰流风机同时运行的状况,首排风机距东侧墙的距离为 6 m,模型总长度为 54 m。

采用非结构化四面体网格,最大网格尺寸为 400 mm,风机表面进行了局部网格加密处理,网格最大尺寸为 20 mm,网络单元数量为 5 867 781 个,三维几何模型及网格如图 4 所示。

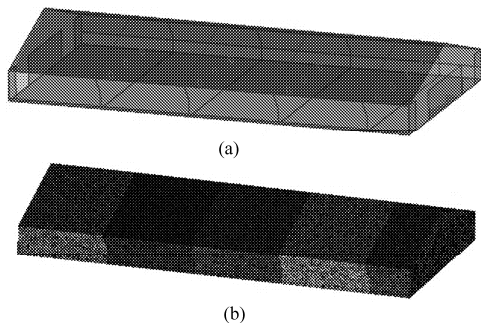


图 4 牛舍三维几何模型及网格划分

Fig. 4 3-D geometric model and grid partition of cow house

(a) 几何模型 (b) 网格

### 2.2 数学模型

流体流动要受到物理守恒定律的支配,基本的守恒定律包括:质量守恒定律、动量守恒定律、能量守恒定律及组分守恒定律。控制方程是这些守恒定律的数学描述,各控制方程都可以表示成以下通用形式<sup>[4]</sup>

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\mathbf{u}\phi) = \text{div}(\Gamma\text{grad}\phi) + S \quad (1)$$

式中  $\rho$ ——空气密度  $t$ ——时间

$\phi$ ——通用求解变量  $\mathbf{u}$ ——速度矢量

$\Gamma$ ——广义扩散系数  $S$ ——广义源项

模拟中不考虑通风过程中的能量交换和组分变化,流体不可压缩,流动处于稳态,则方程组简化为

$$\begin{cases} \text{div}(\mathbf{u}) = 0 \\ \text{div}(u_x\mathbf{u}) = \text{div}(\nu\text{grad}u_x) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \\ \text{div}(v_y\mathbf{u}) = \text{div}(\nu\text{grad}v_y) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \\ \text{div}(w_z\mathbf{u}) = \text{div}(\nu\text{grad}w_z) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \end{cases} \quad (2)$$

式中  $u_x$ ——速度矢量  $\mathbf{u}$  在  $x$  方向的分量

$v_y$ ——速度矢量  $\mathbf{u}$  在  $y$  方向的分量

$w_z$ ——速度矢量  $\mathbf{u}$  在  $z$  方向的分量

$p$ ——流体微元体上的压力

$\nu$ ——空气运动粘度

### 2.3 边界条件

舍内空气除了在扰流风机作用下沿牛舍纵向流动以外,还包括由热压和风压作用引起的自然通风,但试验牛舍北侧为挤奶厅,南侧紧邻 2 m 高围墙,围墙外为树林。试验时使用热线风速仪和发烟笔测试了风速和风向,由于周围建筑的阻挡,测试的风速并不大,风向呈无规律变化趋势,如果考虑外部风速,将与实测值存在较大误差,因此在模拟时没有考虑外界风速、风向变化。而且在实测时,选择了室外无风或风速很小的时段进行,以减少实测值和模拟值之间的误差。流场测试时,同时测试了舍内外的温、湿度,测试表明舍内外的温度差很小,牛舍高度也不是很高,热压作用力影响相对较小,尤其是在风机风速较大的区域,所以没有考虑风压和热压的作用。

舍内气流在扰流风机的作用下由东向西流动,由于无法准确判断各开口的气流方向,将东山墙上开口设为压力入口边界,其他开口部位均设为压力出口边界。地面、屋面、矮墙、脊墙和挡风板均设为壁面边界。将扰流风机设置为内部风扇边界条件,压力跃升按实验室实测值以速度多项式形式输入。

### 2.4 数值求解

采用 Fluent 软件进行数值求解,选用 Realizable  $k-\varepsilon$  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。

### 3 数据分析

#### 3.1 数据处理

数据以平均值 ± 标准差表示。组间差异显著性采用多变量双因素方差分析,  $P < 0.05$  为显著,  $P < 0.01$  为极显著。

#### 3.2 气流扰动效果评价指标

带有扰流风机的开放式牛舍中扰流效果的评价指标目前还没有统一的标准,合理的风机安装参数不但能使奶牛活动的主要区域保持需要的风速,而且适宜风速的作用范围要足够大,以满足舍内气流扰动的需求。奶牛在站立时和躺卧时,牛头的高度大约为距离地面 1.5 m 和 1.0 m 左右,文献[1]中推荐的成年乳牛舍的风速为 0.8 ~ 1.0 m/s,为了保证奶牛在站立和躺卧时,牛头位置有充足的气流,选定距离地面 1.0 m 和 1.5 m 高度水平面上风速大于 1.0 m/s 的区域面积与总面积的百分比作为舍内气流扰动效果的评价指标(用  $\eta_{1.0m}$  和  $\eta_{1.5m}$  表示),该指标数值越大,说明扰流风机的空气扰流效果越好。

由于舍内首排风机与中间各排风机之间的气流场存在着差别,为了减少这种差别对计算的影响,选取第 3 排和第 4 排风机之间的区域作为风机扰流效果评价的计算区域,计算区域内风速大于 1.0 m/s 的速度围墙图如图 5 所示,  $\eta_{1.0m}$  和  $\eta_{1.5m}$  的含意如图 6 所示,图中方框的面积为总计算区域,灰色部分为风速大于 1.0 m/s 的区域。

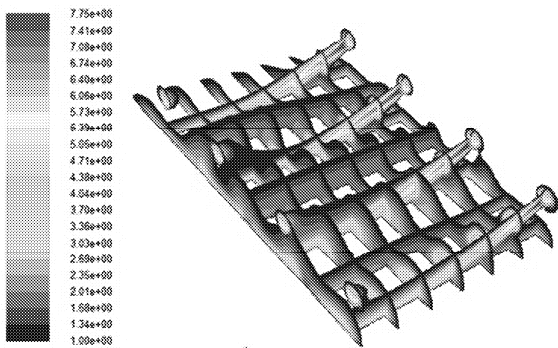


图 5 风速大于 1.0 m/s 区域的气流速度围墙图

Fig.5 Velocity of area where air velocity more than 1.0 m/s

#### 3.3 风机安装参数对气流扰动效果的影响

##### 3.3.1 风机不同安装高度对扰流效果的影响

按照确定的扰流效果评价标准,评价指标计算结果如表 1 所示,在距离地面 1.0 m 和 1.5 m 两个水平面上的各种安装高度对扰流效果的影响没有显著差异 ( $P > 0.05$ )。

风机不同安装高度和角度的扰流效果如图 7 所示,不同安装高度和角度对扰流效果影响的变化曲

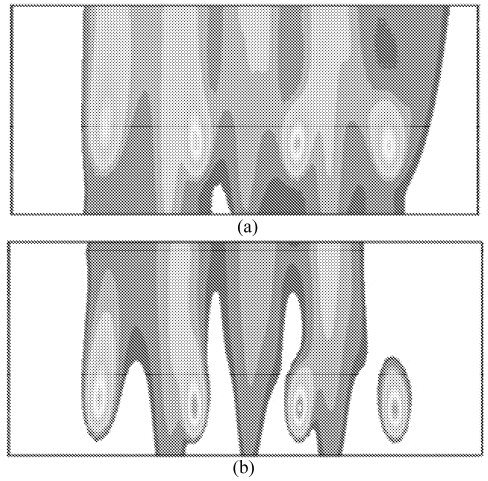


图 6 风速大于 1.0 m/s 的区域面积与总面积对比

Fig.6 Ratio of area where air velocity more than 1.0 m/s to total region

(a) 1.0 m 高度水平面 (b) 1.5 m 高度水平面

表 1 风机不同安装高度的扰流效果

Tab.1 Effect of air flow disturbance between different installation height %

安装高度/m	$\eta_{1.0m}$	$\eta_{1.5m}$
2.6	66.74 ± 7.97 <sup>a</sup>	54.85 ± 6.54 <sup>b</sup>
2.8	65.43 ± 9.28 <sup>a</sup>	55.88 ± 5.67 <sup>b</sup>
3.0	63.59 ± 10.78 <sup>a</sup>	54.60 ± 4.83 <sup>b</sup>
3.2	61.23 ± 12.98 <sup>a</sup>	53.77 ± 3.96 <sup>b</sup>

注:小写字母不同表示差异显著 ( $P < 0.05$ ),小写字母相同表示差异不显著 ( $P > 0.05$ ),下同。

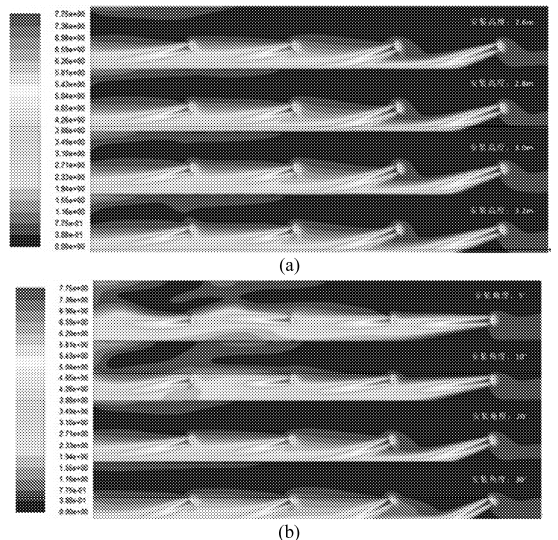


图 7 风机不同安装高度和角度时的气流流场

Fig.7 Flow fields of different installation height and tilt angle of fans

(a) 不同安装高度 (b) 不同安装角度

线如图 8 和图 9 所示。在 1.0 m 高度水平面上,随着高度的增加  $\eta_{1.0m}$  下降。在 1.5 m 高度水平面上,当安装角度为 5° 和 10° 时,随着高度的增加  $\eta_{1.5m}$  下降;当安装角度为 20° 和 30° 时,随着高度的增加

$\eta_{1.5m}$  增加。由此可见, 无论颈枷还是卧栏上方扰流风机的安装高度都不宜过高。

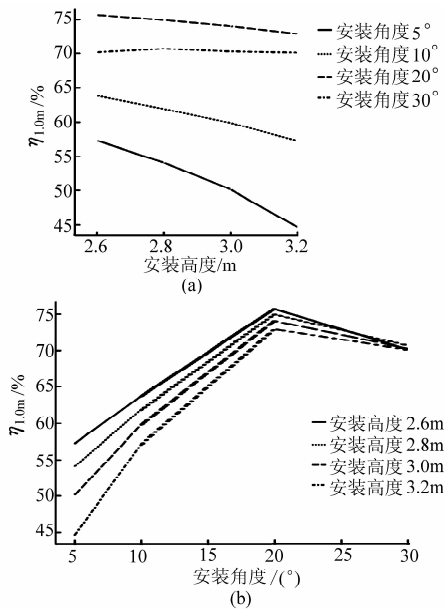


图 8 1.0 m 高度水平面上风机安装高度和角度对扰流效果影响

Fig. 8 Effect of air flow disturbance between different installation height and tilt angle in the surfaces which above ground 1.0 m

(a) 不同安装角度 (b) 不同安装高度

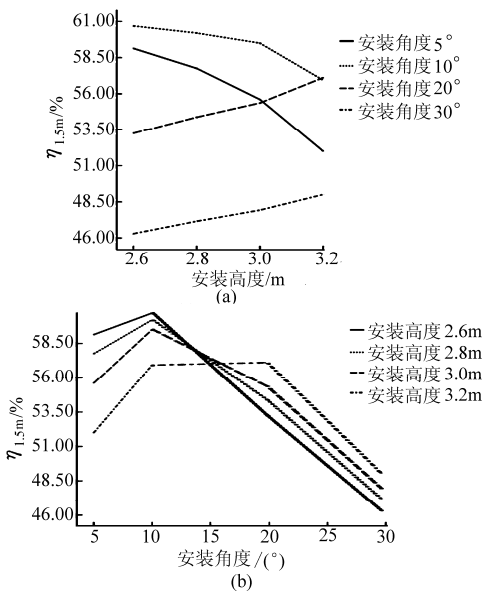


图 9 1.5 m 高度水平面上风机安装高度和角度对扰流效果影响

Fig. 9 Effect of air flow disturbance between different installation height and tilt angle in the surfaces which above ground 1.5 m

(a) 不同安装角度 (b) 不同安装高度

### 3.3.2 风机不同安装角度对扰流效果的影响

风机不同安装角度时评价指标计算结果如表 2 所示, 在 1.0 m 高度水平面上, 5°、10°和 20°这 3 个

安装角度之间的扰流效果差异极显著 ( $P < 0.01$ ), 20°和 30°之间的不存在显著差异 ( $P > 0.05$ ); 在距地 1.5 m 平面上, 5°和 20°的安装角度对扰流效果没有显著差异 ( $P > 0.05$ ), 但 10°与 5°和 20°之间存在显著差异 ( $P < 0.05$ ), 30°与其他 3 个安装角度之间的差异极显著 ( $P < 0.01$ )。

表 2 风机不同安装角度的扰流效果

Tab. 2 Effect of air flow disturbance between different installation tilt angle %

安装角度/(°)	$\eta_{1.0m}$	$\eta_{1.5m}$
5	51.55 ± 5.44 <sup>Aa</sup>	56.13 ± 3.11 <sup>Aa</sup>
10	60.73 ± 2.82 <sup>Bb</sup>	59.33 ± 1.67 <sup>Ab</sup>
20	74.41 ± 1.21 <sup>Cc</sup>	55.03 ± 1.64 <sup>Aa</sup>
30	70.31 ± 0.26 <sup>Cc</sup>	47.60 ± 1.15 <sup>Bc</sup>

注: 同列数值后大写字母不同表示两者差异极显著 ( $P < 0.01$ )。

风机不同安装角度的扰流效果对比如图 7 所示, 由图 8 和图 9 可知, 在 1.0 m 高度水平面上, 当安装角度小于 20°时, 随着角度的增加  $\eta_{1.0m}$  逐渐提高, 当安装角度大于 20°时, 随着安装角度的增加  $\eta_{1.0m}$  下降。卧栏上方的风机, 无论安装高度是多少, 都应该将角度调整到 20°, 此时扰流效果最好。在 1.5 m 高度水平面上, 当安装角度小于 10°时, 随着角度的增加  $\eta_{1.5m}$  逐渐提高, 当安装角度大于 10°时, 随着安装角度的增加  $\eta_{1.5m}$  下降。颈枷上方的风机在运行时安装角度应该调整为 10°。

### 3.4 不同型号风机间空气扰动效果的差别

上述分析都是针对测试牛舍已经安装的风机型号, 为了对比不同型号风机的气流分布状况, 同时对另外 2 个型号 (风机叶轮直径相同) 国产风机的技术参数进行了测试, 测试结果分别作为新的风扇边界条件输入上述 4 个模型 (风机角度都为 10°) 中, 3 种型号风机的气流扰动效果如表 3 所示, 结果表明 3 种不同型号 (风机叶轮直径相同) 风机的扰流效果没有显著差异 ( $P > 0.05$ )。

表 3 3 种不同型号风机扰流效果的对比

Tab. 3 Effect of air flow disturbance between three different fans %

风机型号	$\eta_{1.0m}$	$\eta_{1.5m}$
TFP-H100T	63.39 ± 3.60 <sup>a</sup>	62.51 ± 3.77 <sup>b</sup>
DJF(d)-1000	62.91 ± 3.11 <sup>a</sup>	62.05 ± 3.62 <sup>b</sup>
SDF-1M	63.33 ± 3.13 <sup>a</sup>	62.61 ± 3.62 <sup>b</sup>

### 3.5 数值模拟与现场实测结果的对比分析

为了验证模拟结果的准确性, 从数值模拟结果中选取与现场测点空间位置相同的风速, 将模拟值与实测值进行配对  $t$  检验。现场实测风速选取风机角度为 30°时, 距离地面高度 1.5 m 水平面上 11 个

测点风速的水平分量,风速实测值选取测试期间典型日内连续测试的90组数据的平均值,风速结果如图10所示。配对 $t$ 检验结果为: $t=1.126, P=0.252 > 0.05$ ,表明按照 $\alpha=0.05$ 水平,模拟风速与实测风速不存在显著性差异,但低速区的相对误差较大,主要是由于仪器精度和舍外风速风向、热压作用等不确定因素的影响。

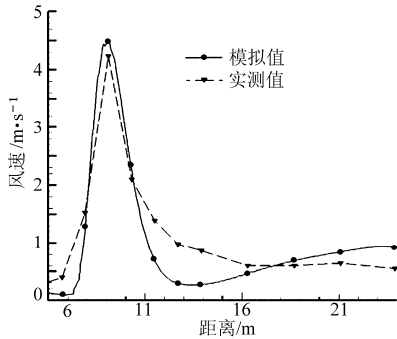


图10 牛舍内风速的模拟值与实测值

Fig. 10 Comparison of wind speed value in dairy cow house between simulation and measured values

## 4 结论

(1) 选择了奶牛在站立时和躺卧时牛头高度位置的距离地面1.0 m和1.5 m高度水平面作为扰流风机评价的基准平面,以这两个平面上风速大于1.0 m/s的区域面积与总面积的百分比作为舍内气流扰动效果的评价指标。

(2) 风机安装高度对扰流效果的影响没有显著差异( $P > 0.05$ ),为了达到最佳的扰流效果,在满足其他设备运行的条件下,颈枷上方和卧栏上方风机应该尽量降低安装高度。

(3) 风机的不同角度对扰流效果的影响不同,颈枷上方和卧栏上方风机在运行时应调整为不同的角度,卧栏上方的风机角度为 $20^\circ$ 、颈枷上方风机角度为 $10^\circ$ 的扰流效果最好。

(4) 按照 $\alpha=0.05$ 水平,CFD模拟风速与现场实测风速不存在显著性差异。

## 参 考 文 献

- 1 颜培实,李如治.家畜环境卫生学[M].4版.北京:高等教育出版社,2011.
- 2 仲庆振,周海柱,纪术远,等.夏季不同类型牛舍内环境的比较研究[J].黑龙江畜牧兽医,2010(23):73~74.
- 3 Botcher R W, Magura J R, Young J S, et al. Effects of tilt angles on airflow for poultry house mixing fans[J]. Applied Engineering in Agriculture, 1995, 11(5):721~730.
- 4 王福军.计算流体动力学分析——CFD软件原理与应用[M].北京:清华大学出版社,2004.
- 5 Choi K, Albright L D, Timmons M B. An application of the  $k-\epsilon$  turbulence model to predict how a rectangular obstacle in a slotventilated enclosure affects airflow[J]. Transactions of the ASAE, 1990, 33(1):271~278.
- 6 Hoff S J, Janni K A, Jacobsen L D. Three-dimensional buoyant turbulent flows in a scaled model, slot-ventilation, livestock confinement facility[J]. Transactions of the ASAE, 1992, 35(2):671~686.
- 7 Herral B B, Boon C R. Comparison of predicted and measured air flow patterns in a mechanically ventilated livestock building without animals[J]. Agriculture Engineering Research, 1997, 66(3):221~228.
- 8 Tomas Norton, Jim Grant, Fallon Richard, et al. Assessing the ventilation effectiveness of naturally ventilated livestock buildings under wind dominated conditions using computational fluid dynamics[J]. Biosystems Engineering, 2009, 103(1):78~99.
- 9 Saha C K, Wu Wentao, Zhang Guoqiang, et al. Assessing effect of wind tunnel sizes on air velocity and concentration boundary layers and on ammonia emission estimation using computational fluid dynamics (CFD) [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2011, 78(1):49~60.
- 10 Wu Wentao, Zhai John, Zhang Guoqiang, et al. Evaluation of methods for determining air exchange rate in a naturally ventilated dairy cattle building with large openings using computational fluid dynamics (CFD) [J]. Atmospheric Environment, 2012, 63:179~188.
- 11 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,2006,38(3):379~382.
- 12 李文良,施正香,王朝元.密闭式平养鸡舍纵向通风的数值模拟[J].中国农业大学学报,2007,12(6):80~84.
- 13 韩华.猪舍冬季供暖环境的试验测定与数值模拟[D].北京:中国农业大学,2007.
- 14 贺城.基于CFD的猪舍内气流场和温度场模拟研究[D].武汉:华中农业大学,2009.
- 15 庞真真.母猪冷水降温猪床的研究[D].北京:中国农业大学,2011.
- 16 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 CSAE, 2011, 27(12):227~233. (in Chinese)