doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.12.017

导流罩长度对农用轴流风机性能的影响

丁　涛[1]　赵　洋[1,2]　施正香[1,3]　王朝元[1,3]

(1.中国农业大学水利与土木工程学院,北京 100083;2.北京市供水管网与安全节能中心,北京 100083;
3.农业农村部设施农业工程重点实验室,北京 100083)

摘要:通过三维激光扫描仪建立农用轴流风机几何模型,利用密闭风室试验测试数据验证数值模型的准确性,最后采用数值模拟研究了农用轴流风机导流罩长度变化对风机内外特性的影响。保持导流罩进口位置、圆角半径与扩散角不变,定义导流罩长度与叶顶轴向宽度的比值为 K,K 选取 0.50、0.78、0.90、1.0、1.1、1.2、1.5、2.0,对 7 个不同进口静压工况点进行数值模拟。结果表明,K 从 0.50 上升到 1.0 的过程中,风机风量和能效比提升明显;K 取 1.0~1.1 时风机风量和能效比最高,相比 $K=0.78$ 的原型风机提升约 10%;K 从 1.1 升至 2.0 的过程中,风量略有下降,能效比下降明显。利用 Q 准则对叶顶和外框区域的涡结构进行识别,发现随着 K 的增长,叶顶泄漏涡经历了分裂、衰减和再发展 3 个过程。$K=1.0$ 时能有效抑制叶顶泄漏涡的发展,最大程度降低叶顶涡的强度。导流罩的加长能明显减少外框涡的产生。

关键词:轴流风机;导流罩长度;数值模拟

中图分类号:S237　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2018)12-0135-08

Influence of Length of Shroud on Performance of Agricultural Axial Fan

DING Tao[1]　ZHAO Yang[1,2]　SHI Zhengxiang[1,3]　WANG Chaoyuan[1,3]

(1. *College of Water Resources and Civil Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*
2. *Beijing Engineering Research Center of Safety and Energy Saving Technology for Water Supply Network System*, *Beijing* 100083, *China*
3. *Key Laboratory of Agricultural Engineering in Structure and Environment*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: The geometric model of a 50-inch agricultural axial fan was established by a 3D laser scanner. The experimentally verified numerical model was used to study the influence of length of shroud of agricultural axial fan on the internal and external characteristics of fan. Keeping the inlet position of the shroud, the rounded corner radius and the diffusion angle were unchanged, and defining the ratio of length of shroud to axial width of tip as K. The value of K was chosen as 0.50, 0.78, 0.90, 1.0, 1.1, 1.2, 1.5 and 2.0. Totally seven different imported static pressure operating points were chosen for numerical simulation. The results showed that during the process of increasing the K from 0.50 to 1.0, the air volume and energy efficiency ratio of fan were obviously improved. When K was from 1.0 to 1.1, the fan air volume and energy efficiency ratio were the highest, which was about 10% higher than those of the prototype fan with $K=0.78$. When the K was from 1.1 to 2.0, the air volume was slightly decreased. The energy efficiency ratio was decreased significantly. Using the Q criterion to identify the vortex structure in the tip and outer frame regions, it was found that with the growth of K, the tip leakage vortex underwent three processes of division, attenuation and redevelopment. When K was 1.0 it can effectively inhibit the development of tip leakage vortex and minimize the strength of tip vortex. The lengthening of the shroud can significantly reduce the outer frame vortex.

Key words: axial fan; length of shroud; numerical simulation

0　引言

轴流风机在畜禽舍和温室通风降温工程中应用广泛[1-3],其低压和大风量的特性适合农业通风的要求。农用轴流风机多以风量和能效比为性能评价指标,其性能直接影响农业设施环境调控和节能的

收稿日期:2018-08-06　修回日期:2018-10-12

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFF0213604)和国家奶牛产业技术体系项目(CARS-36)

作者简介:丁涛(1974—),女,副教授,博士,主要从事流体动力学和农业生物环境研究,E-mail:dingtao@cau.edu.cn

效果。农用轴流风机通常安装在建筑墙体上,按照有无出口扩散筒可分为两类,现有研究证明出口扩散筒能够有效提升风机性能[4],若不设出口扩散筒,则会在叶轮周边安装较短的导流罩,构成半开式轴流风机。叶顶泄漏涡是该类风机叶顶区域最主要的流动特征,其产生、发展及耗散与轴流风机的气动性能密切相关[5-7]。JANG 等[8-10]研究了空调室外风机叶顶区域的涡流结构,指出通过优化导流罩形状,可以控制叶顶区域的旋涡流动。导流罩长度的变化将影响叶顶区域的流场。因此,研究导流罩长度对风机性能的影响,是优化风机性能的可行途径。

王巍雄等[11]和陆志伟[12]对比了固定长度的导流罩位于叶轮不同相对轴向位置时的空调室外风机性能,发现导流罩出口边与叶片后缘齐平时风机风量最大。丁国良等[13]、王正等[14]通过模拟试验分别发现了空调室外风机和冰箱冷凝风机的导流罩轴向长度存在最佳值,使风机出口相对湍流强度最低。王嘉冰[15]研究了空调室外风机导流罩在出口位置不变时,导流罩进口位置变化对风机性能的影响,发现风机风量随导流罩轴向长度的增加而增大并逐渐趋于平稳。

目前针对轴流风机导流罩长度的研究主要集中在空调、冰箱等家电用风机领域,受限于该类风机的结构,目前尚缺乏在导流罩进口边位置固定时,其出口边位置变化对轴流风机性能影响的研究。本文通过密闭风室试验测试与数值模拟相结合的方法,研究农用轴流风机的导流罩进口边位置固定时其长度变化对风机内外特性的影响。

1 数值模拟

1.1 原型风机

本文研究对象为山东省青岛市某公司生产的镀锌铁皮风机,如图 1 所示。其基本参数为:叶轮直径 1 268 mm,叶片数 6,叶片厚度 1.2 mm,叶片材料不锈钢,外框尺寸 330 mm × 1 375 mm × 1 375 mm,百叶窗叶片数 10,百叶窗单个叶片尺寸 1 305 mm × 130 mm。电动机位于外框右上角(从进风侧看),电动机型号 YJD90S-4,额定功率 1.1 kW,电动机额定转速 1 400 r/min,电动机通过带传动带动叶轮旋转,经胶带轮减速后叶轮额定转速为 450 r/min。原型风机在中国农业大学农业农村部设施农业工程重点实验室进行性能测试,风机试验台如图 2 所示[16]。

1.2 风机模型与计算域

利用加拿大 CREAFORM 公司生产的 Handy SCAN3D 型扫描仪对原型风机叶片进行三维激光扫描,得到叶片三维模型,在建模过程中对叶片上的冲压凹槽和铆钉等结构进行了简化处理,如图 3 所示。



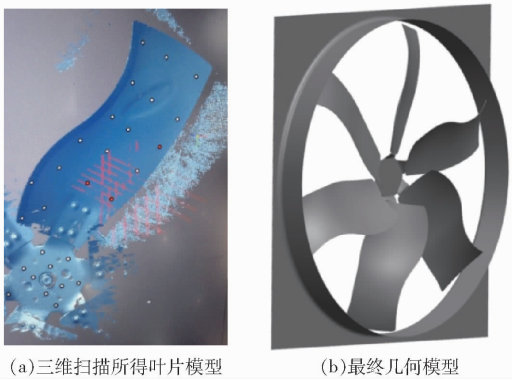
图 1 原型风机实物图

Fig. 1 Entity of prototype fan



图 2 风机试验台

Fig. 2 Fan test bench



(a)三维扫描所得叶片模型 (b)最终几何模型

图 3 利用三维扫描得到的叶片模型与最终生成的风机叶轮及导流罩几何模型

Fig. 3 Blade model obtained by 3D scanning and finally generated geometry model of fan impeller with shroud

导流罩由一个与外框连接的竖直壁面以及一个与该壁面呈 $\theta = 85°$ 的圆锥面组成(图 4),两个面之间由 $r = 20$ mm 的圆角过渡,导流罩的竖直壁面与叶顶部分的进风侧位于同一轴向位置。导流罩长-叶宽比 K 定义为

$$K = \frac{L}{B} \tag{1}$$

式中 L——导流罩整体轴向长度

B——叶顶轴向宽度

原型风机 $L = 80$ mm,$K = 0.78$。保持导流罩的

竖直壁面位置以及 r、θ 参数不变，通过改变 K 的取值来研究导流罩长度对风机性能的影响。

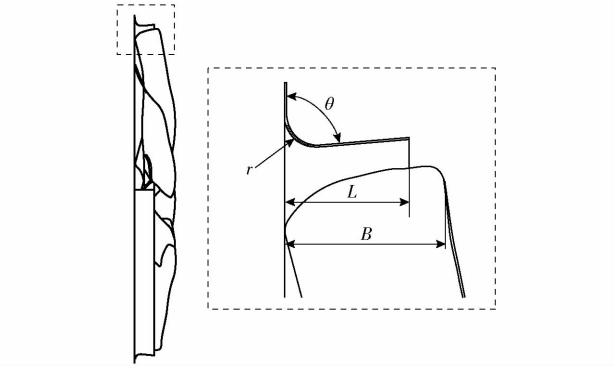


图 4　导流罩结构示意图

Fig. 4　Schematic diagram of shroud

如图 5 所示，将密闭风室毕托管静压测量点的位置作为计算域进口。进口面尺寸为风室截面尺寸，即 2 740 mm × 2 740 mm。风机模型为通过三维扫描重构的几何模型，省略了电动机、胶带轮和支撑架等结构。风机出口接 5 500 mm × 5 500 mm × 5 500 mm 的开放域。如图 6 所示，风机外框被导流罩的竖直壁面分割为前后两部分，进口侧外框与风室合并造型为进口域，出口侧外框与开放域合并造型为出口域。

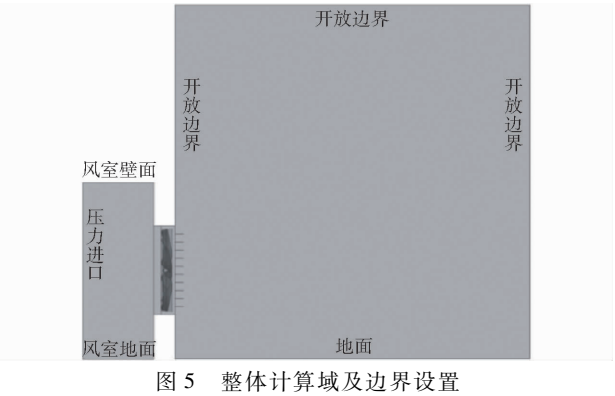


图 5　整体计算域及边界设置

Fig. 5　Overall calculation domain and boundary settings

1.3　边界条件设置

如图 6 所示，边界条件设置如下：相对压力为 1 个标准大气压；进口设为压力进口，进口相对静压与性能测试时所测工况点的进口相对静压保持一致，即 0、－9.8、－19.6、－29.4、－39.2、－49.0、－58.8 Pa，共 7 个工况点；出口设为开放边界，由于直接与大气相接，且涉及到射流卷吸，故相对开放压力设为零，选用卷吸模型；叶轮、风机外框、导流圈、百叶窗和地面等设为无滑移壁面。

1.4　网格划分

如图 7 所示，采用非结构网格进行网格划分，对于流动复杂的叶轮部分应适当网格加密。建立总网格数约为 380 万、620 万和 1 100 万的 3 套网格，计算得到进口静压为 －29.4 Pa 时的原型风机风量分别为 35 962、36 512、37 102 m^3/h，1 100 万网格与 620 万网格相比，风量变化低于 2%。综合考虑计算精度和计算资源，选择总网格数约为 620 万的网格划分策略，如图 8 所示，其中进口域网格单元数约 50 万，旋转域网格单元数约 360 万，出口域网格单元数约 210 万。

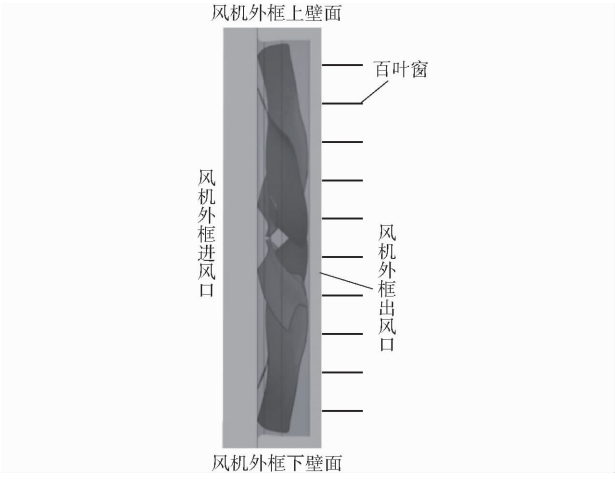


图 6　风机计算域

Fig. 6　Calculation domain of fan

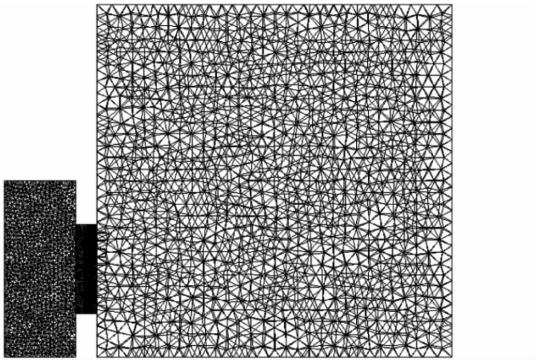


图 7　整体网格划分

Fig. 7　Overall meshing

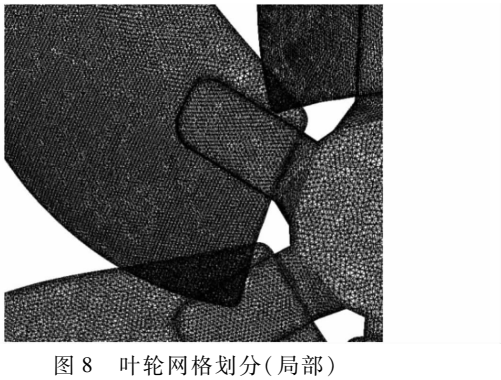


图 8　叶轮网格划分（局部）

Fig. 8　Impeller meshing (partial)

1.5　数值计算方法

利用 ANSYS CFX 15.0 软件采用全隐式耦合求解技术进行稳态模拟，选用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型，已有研究表明该湍流模型对低压轴流风机进行性能模

拟效果最佳[17],RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型通过采用解析式计算湍动能及湍流耗散率的湍流普朗特数,代替了标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型中固定不变的湍流普朗特经验常数,提高了该湍流模型的模拟精确度;同时在湍流耗散率 ε 的输运方程中加入耗散能修正项 R_ε 有利于对卡门常数的估算[18]。动量方程对流项和湍流输运方程对流项采用高阶精度格式。求解残差达到 10^{-4} 量级且趋于稳定时认为计算收敛。

2 计算结果及分析

2.1 模拟结果与试验结果对比

由于在农业风机中,相比于风机的压升,风量更直接影响农业设施的通风换气效率,因此风量是用户最为关注的农用轴流风机性能指标。在农业风机领域,习惯上用能效比 E 表征风机的能效,表示单位耗电量所产生的风量。能效比越高,节能效果越佳,其计算公式为

$$E=\frac{q}{p} \tag{2}$$

式中 q——风量,m^3/h

p——电机输入功率,W

模拟相对误差 δ 为

$$\delta=\frac{\Delta}{T}\times 100\% \tag{3}$$

式中 Δ——模拟值与试验值的差值

T——试验值

将 $K=0.78$ 的原型风机风量数值模拟结果与试验台测试结果对比,如图 9 所示,7 个工况点的风量模拟相对误差在 -4.6% ~ -0.7% 之间,平均误差 -2.77%。模拟风量与试验风量的相对误差较为稳定,两条曲线的趋势较为一致。

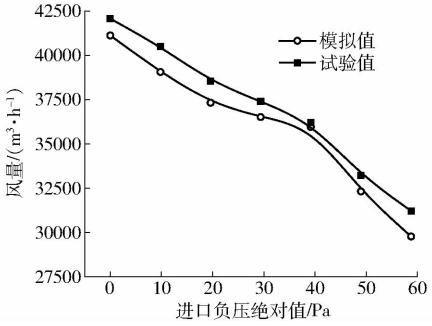


图 9 原型风机风量模拟值与试验值对比

Fig. 9 Comparison of simulated and experimental values of air volume about prototype fan

由于风机传动结构紧凑,无法布置扭矩仪测量轴功率,能效比的试验值由试验风量除以电动机输入功率得到,而数值模拟中只能得到叶轮轴功率。为了使数据更具可比性,将数值模拟中的叶轮轴功率修正到电动机输入功率,其中电动机效率取 GB 18613—2012 规定的二级能效限定值 84.1%,普通 V 型胶带传动效率取 89%,主胶带轮的轴承效率取 94%[19]。

如图 10 所示,7 个工况点的能效比模拟相对误差在 -2.5% ~1.9% 之间,平均误差 -0.2%。模拟能效比与试验能效比的相对误差较为稳定,两条曲线的趋势较为一致。

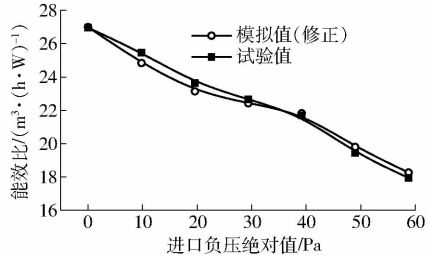


图 10 原型风机能效比模拟值与试验值对比

Fig. 10 Comparison of simulated and experimental values of air volume about prototype fan

上述原型风机风量、能效比的模拟值与试验值对比,两者存在较小的误差。数值模型对传动部分和叶片冲压凹槽、铆钉等结构进行了简化,并且传动部分的效率通过查询手册资料得到,这可能是误差产生的原因。总体可以认为模拟值与试验值吻合度较好,该数值模型能够反映风机的实际性能特性。后续模拟试验将以该数值模型为基础,研究导流罩长度对风机性能的影响。

2.2 导流罩长度对风机外特性的影响

在数值模拟中 K 取 0.50、0.78、0.90、1.0、1.1、1.2、1.5、2.0 共 8 个值。如图 11 所示,在不同的静压工况下,风量随导流罩长-叶宽比 K 的增加普遍呈现出先升高再缓慢下降并趋于平稳的变化规律。

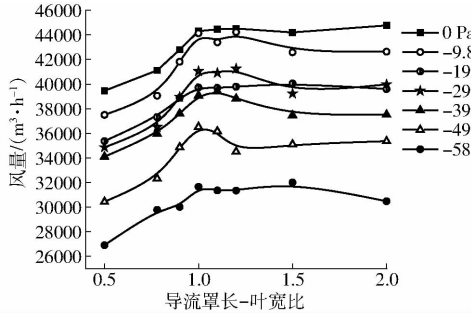


图 11 不同静压时风量随 K 的变化曲线

Fig. 11 Changing curves of air volume with K when static pressures were different

为了进一步消除单个模拟值波动误差的影响,更好地观察风量随能效比的变化规律,将 7 个进口静压工况的风量取平均值;另外,由于 -40 ~ -20 Pa 是农用轴流风机的常用工作区,因此将 -19.6、-29.4、-39.2 Pa 这 3 个进口负压工况的风量取平

均值进行分析。如表 1 所示，随着导流罩长-叶宽比 K 由 0.50 提升到 1.0，风量有较为明显的提升，在 K 取值 1.0～1.1 之间时，风量处于最高水平，在 K 从 1.2 升至 2.0 的过程中，风量相比最高值略有下降，并逐渐趋于平缓。$K=1.0$ 与 $K=0.78$ 时相比，7 个工况点平均风量提升 10.1%，常用工作区 3 个工况点平均风量提升 9.2%。

表 1　不同 K 的平均风量

Tab.1　Changes of average air volume with K

m^3/h

K	7 个工况点	工作区 3 个工况点
0.50	30 244.4	34 774.2
0.78	31 753.0	36 595.1
0.90	33 558.9	38 476.1
1.0	34 973.8	39 949.6
1.1	34 862.5	40 007.8
1.2	34 731.1	39 954.3
1.5	34 094.0	38 919.9
2.0	34 267.6	39 031.8

探究 K 变化对风机能效比的影响，如图 12 所示，在不同进口静压工况下，能效比随导流罩长-叶宽比 K 的增加，普遍呈现出先升高再下降的变化规律，能效比多在 $K=1.0$ 或 $K=1.1$ 时达到最大值。将 7 个静压工况取平均值，并对位于常用工作区的 -19.6、-29.4、-39.2 Pa 这 3 个工况的能效比取平均值。如表 2 所示，导流罩长-叶宽比 K 在 0.50 和 0.78 时，风机能效比处于较低水平，K 由 0.78 提升到 1.0，风机能效比有较大幅度的提升，K 取值 1.0～1.1 之间时，能效比处于相对的最高水平，从 $K=1.2$ 开始，能效比随 K 值的增加而呈现下降趋势。$K=1.0$ 与 $K=0.78$ 时相比，7 个工况点平均能效比提升 10.7%，常用工作区 3 个工况点平均能效比提升 9.6%。

2.3　导流罩长度对风机流场特性的影响

2.3.1　旋转域叶顶泄漏涡的 Q 准则识别

为了进一步研究 K 的变化对风机内特性的影响，选取农用轴流风机常用工作区（-40～-20 Pa）的中间值，即进口相对静压为 -29.4 Pa 时的不同 K 值案例的内部流场对比分析。

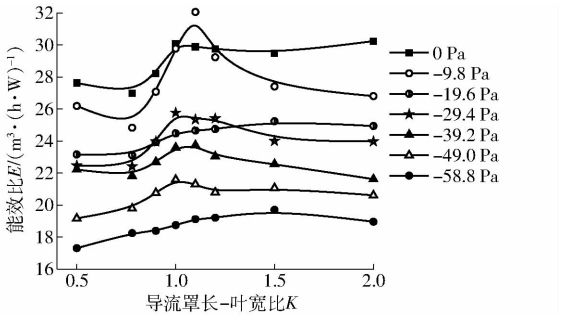


图 12　不同静压时能效比随 K 的变化曲线

Fig. 12　Changing curves of energy efficiency ratio with K when static pressures were different

表 2　不同 K 的平均能效比

Tab.2　Changes of average energy efficiency ratio with K

$m^3/(h\cdot W)$

K	7 个工况点	工作区 3 个工况点
0.50	22.60	22.62
0.78	22.47	22.46
0.90	23.58	23.54
1.0	24.87	24.62
1.1	25.16	24.59
1.2	24.61	24.41
1.5	24.21	23.94
2.0	23.89	23.52

利用涡辨识方法显示数值模拟计算结果中涡流的三维结构，目前常用的涡辨识方法有多种[20]，本文选用 Q 准则识别涡结构，相比于涡量识别方法，Q 准则能够避免由壁面强剪切引起的涡结构的错误识别。

速度梯度张量 $\nabla \boldsymbol{u}$ 的特征值 λ 满足

$$\lambda^3 + P\lambda + Q\lambda + R = 0 \tag{4}$$

HUNT 等[21]基于式(4)的第二变量提出 Q 准则，定义为

$$Q = \frac{1}{2}(\boldsymbol{\Omega}_{ij}\boldsymbol{\Omega}_{ij} - \boldsymbol{S}_{ij}\boldsymbol{S}_{ij}) \tag{5}$$

其中

$$\boldsymbol{\Omega}_{ij} = \frac{1}{2}(\boldsymbol{u}_{ij} - \boldsymbol{u}_{ji}) \tag{6}$$

$$\boldsymbol{S}_{ij} = \frac{1}{2}(\boldsymbol{u}_{ij} + \boldsymbol{u}_{ji}) \tag{7}$$

式中　$\boldsymbol{\Omega}_{ij}$、$\boldsymbol{S}_{ij}$——旋转率张量、应变率张量

$\boldsymbol{u}_{ij}$、$\boldsymbol{u}_{ji}$——速度张量

Q 准则反映了旋转率和应变率的关系。Q 表示转动速率的 $\boldsymbol{\Omega}_{ij}\boldsymbol{\Omega}_{ij}$ 超过应变率 $\boldsymbol{S}_{ij}\boldsymbol{S}_{ij}$ 的程度。在 $Q>0$ 的位置，转动速率 $\boldsymbol{\Omega}_{ij}\boldsymbol{\Omega}_{ij}$ 占主导地位，即在该区域涡旋结构占主导地位[22]。

如图 13 所示，在叶轮旋转域，如红圈中黄色 Q 准则等值面所示，Q 准则能够识别出位于叶顶处的间隙泄漏涡。叶顶泄漏涡起始于叶顶背面前缘，并沿叶顶背面发展。$K=0.50$ 时，旋转区域的泄漏涡在叶片背面发展成一条超出导流罩出口边的不规则涡带；$K=0.78$ 时，该涡带在导流罩出口边出现断裂倾向，以导流罩出口边为界，分裂为上下游两处涡带；$K=0.90$ 时，导流罩出口边下游涡带体积明显减小；$K=1.0$ 时，导流罩出口边下游的涡带完全消失，仅剩位于叶片背面的涡带，该涡带在导流罩出口边附近停止发展，叶顶泄漏涡带的总体积在所有案例

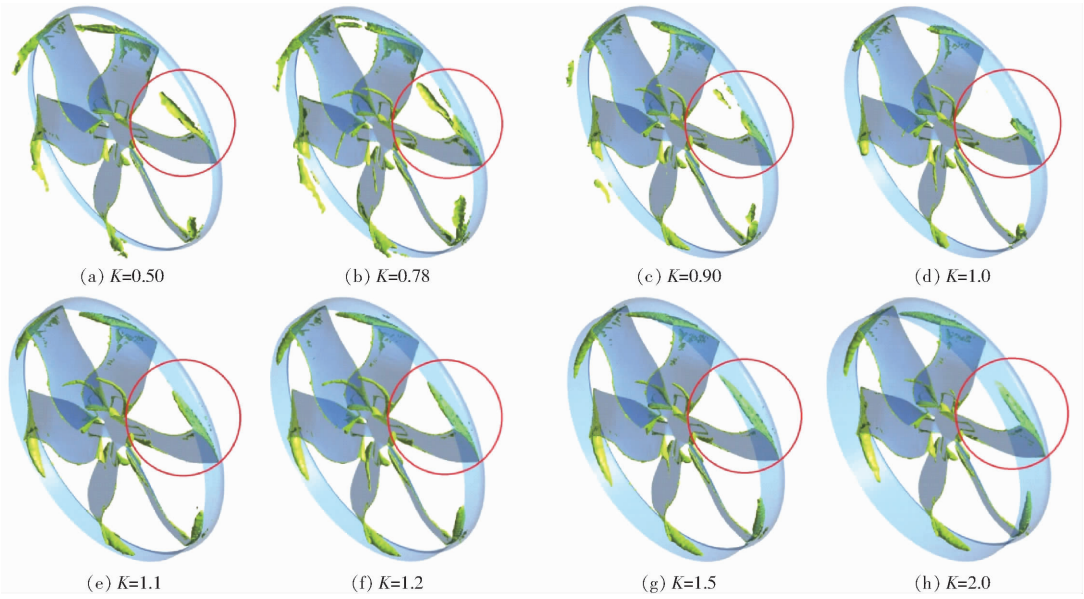


图 13 风机旋转域 Q 准则等值面图($Q=4\times10^4\ s^{-2}$)

Fig. 13 Isosurface of Q criterion at fan rotating domain ($Q=4\times10^4\ s^{-2}$)

中最小;$K=1.1$ 时,叶片背面涡带长度明显增加,但未超出导流罩出口边;$K=1.2$、$K=1.5$ 时,随着导流罩长度的增加,涡带长度略有增加。$K=2.0$ 时,该增长趋势不再明显。

2.3.2 叶顶区域流线图及轴向速度云图

为了观察更为详细的流场细节,过叶轮轴线沿竖直方向做截面,该截面接近叶顶后缘区域,图 13 的分析表明,该区域叶顶泄漏涡发展较为充分且 $K=0.78$ 时叶顶泄漏涡在该区域发生了分裂,因此该截面的流场信息能够反映不同案例的流场特性。故取该截面的叶顶部分作对比分析(图 14),截面位置及观察视角如图 15 所示,图 14 中各线条含义参见图 16。

如图 14 所示,$K=0.50$ 时,叶顶处的泄漏涡由于缺少导流罩的阻挡,发展至外框区域,形成了较大的涡旋;$K=0.78$ 时,该泄漏涡被导流罩截断为两部分,一部分成为位于叶顶与导流罩之间的叶顶涡,另一部分发展为位于外框区域的外框涡;$K=0.90$ 时,叶顶涡继续存在,但由于导流罩对从叶顶进入外框的气流进行了有效的阻隔,引导空气沿轴向流出,从而导致外框涡消失,但此时导流罩对叶顶气流的轴向引导能力不足,从叶顶流出的气流与叶轮轴线呈较大角度;$K=1.0$ 时,从叶顶流出的气流与叶轮轴线所呈角度明显减小,叶顶涡的强度在所有案例中最小,从轴向速度云图可以看出,此时叶顶涡处轴向低速区明显小于其它案例,叶顶漩涡区的阻塞效应明显减轻,导流罩有效流通面积增加,这可能是 $K=1.0$ 时风机风量最大的原因之一;$K=1.1$ 时,叶顶涡较 $K=1.0$ 时有所增强,从叶顶流出的气流与叶轮轴线所呈夹角与 $K=1.0$ 时相比也有所增大,这种气流扩散度的增大可能是由增强的叶顶涡所导致的;$K=1.2$ 时,由于导流罩长度的增加,从叶顶流出的气流与叶轮轴线所呈夹角有所减小,说明导流罩的加长在 $K=1.2$ 时开始抵消叶顶涡对扩散度的增

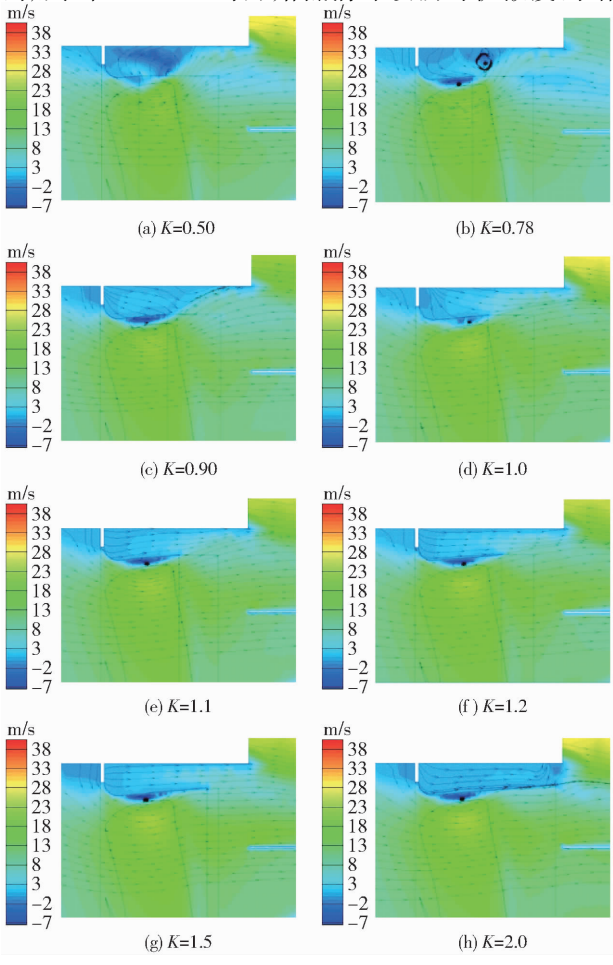


图 14 叶顶位置的流线和轴向速度云图

Fig. 14 Clouds of streamlines and axial velocity at tip of blade

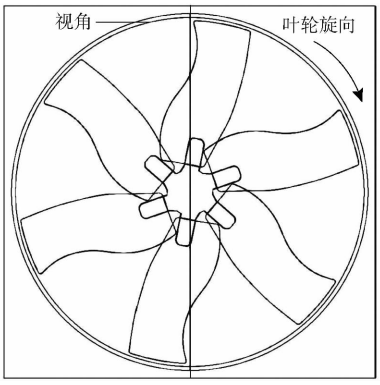


图 15　图 14 截面位置和视角示意图

Fig. 15　Sketch of section position and observation direction of Fig. 14

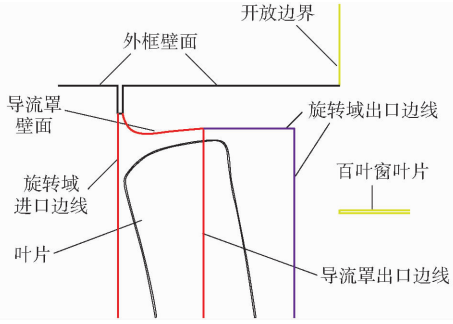


图 16　图 14 中各线条含义

Fig. 16　Meaning of each line in Fig. 14

大作用，使得出口气流的扩散度有所减小；$K = 1.5$ 时，导流罩出口气流的扩散被进一步控制，叶顶涡对气流扩散度的影响基本被消除；$K = 2.0$ 时，在外框区域的出口呈现出一定程度的不规则流动，这可能是由导流罩过长导致的外框出口面积减小所致。图 14 所反映的流场涡结构随 K 值的变化规律与图 13 所示较为一致，表明了 Q 准则在叶顶泄漏涡结构识别方面的有效性。

2.3.3　外框涡的 Q 准则识别

通过对图 14 的分析可知，导流罩长度变化不仅影响叶顶涡的强度，对外框区域的涡强度也有较大影响。由于图 14 只展示了单个截面的流场信息，为了全面观察导流罩长度变化对整个外框区域涡强度的影响，图 17 采用与图 14 相同的观察方向，利用 Q 准则等值面图显示了整个外框区域与百叶窗附近的涡结构。将外框、导流罩和叶轮做不同程度半透明淡蓝色处理，外框用红线圈出，黄色部分为 Q 准则等值面。

如图 17 所示，不论 K 如何变化，百叶窗附近均存在不同程度的涡结构，这些涡结构将会影响降低风机有效流道面积，导致风量降低，这与现有试验研究[23]一致。$K = 0.50$ 时，在外框区域呈现出大量不规则的涡结构；$K = 0.78$ 时，外框区域的涡结构体积明显减小；$K = 0.90$ 时，外框涡开始集中在导流罩出口边的下游，而在导流罩出口边的上游已没有明显的外框涡；从 $K = 0.90$ 至 $K = 2.0$，外框涡均能够被较好地控制在导流罩出口边的下游。图 17 显示的涡分布与图 14 的分析较为一致，导流罩的加长能够明显降低外框涡的强度。

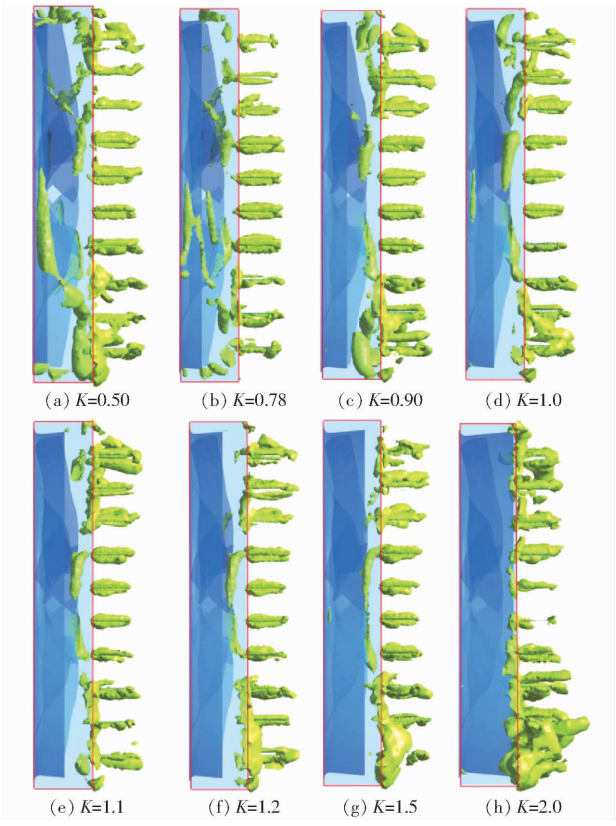


图 17　外框与百叶窗区域 Q 准则等值面图（$Q = 2 \times 10^4\ s^{-2}$）

Fig. 17　Isosurface of Q criterion at outer frame and shutter domain ($Q = 2 \times 10^4\ s^{-2}$)

3　结论

（1）导流罩的长度变化对风机外特性有明显影响，导流罩长-叶宽比 K 最佳值在 1.0 ~ 1.1 之间，此时风机的风量和能效比均处于最佳水平，导流罩过短（$K < 0.90$）会导致风量和能效比快速下降，导流罩过长（$K > 1.1$）并不能提升风量和能效比，反而使风量和能效比在一定程度上有所降低。$K = 1.0$ 时，常用工作区平均风量和平均能效比较原型风机（$K = 0.78$）均有 10% 左右的提升。

（2）通过 Q 准则能有效识别出叶顶泄漏涡的结构，与流线及轴向速度云图所反映的流场特征具有较好的一致性。

（3）导流罩过短（$K = 0.50$）时，叶顶泄漏涡将从叶顶处无阻碍地发展至风机外框区域，引起外框区域涡结构的增多。导流罩加长过程中（$K = 0.78$），叶顶泄漏涡被导流罩分裂成存在于叶顶以

及外框区域的两部分,即叶顶涡与外框涡。导流罩加长至$K \geqslant 0.90$后,叶顶涡将经历衰减和再发展的过程,同时外框涡强度有所降低,且其能够被较好地控制在导流罩出口边下游。导流罩长-叶宽比K取值1.0时叶顶泄漏涡的强度最低,叶顶泄漏涡强度的降低能增大风机导流罩有效流通面积,有利于风量的提升。$K \geqslant 1.1$之后,外框涡虽已得到有效控制,但是叶顶涡强度增大,并随着导流罩的加长而在叶片出口侧下游贴合着导流罩内壁继续发展。

参 考 文 献

1 赵云, 沈剑英, MEIR T. 湿帘风机系统温室夏季蒸腾与微气候试验[J]. 农业机械学报, 2008, 39(8):109 - 113.
ZHAO Yun, SHEN Jianying, MEIR T. Experiment on microclimate in the greenhouses by fan and pad [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(8):109 - 113. (in Chinese)

2 张树阁, 宋卫堂, 滕光辉,等. 湿帘风机降温系统安装高度对降温效果的影响[J]. 农业机械学报, 2006, 37(3):91 - 94.
ZHANG Shuge, SONG Weitang, TENG Guanghui, et al. Cooling effect of different installation height of wet-curtain fan-cooling system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(3):91 - 94. (in Chinese)

3 黄震宇, 高浩天, 朱森林,等. 南方连栋塑料温室夏季机械通风优化设计[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(1):252 - 259.
http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20170133&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.01.033.
HUANG Zhenyu, GAO Haotian, ZHU Senlin, et al. Optimization design of mechanical ventilation for multi-span plastic greenhouses in southern China during summer[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(1):252 - 259. (in Chinese)

4 艾子健, 陈燎原, 王西来,等. 基于FLUENT的通风机扩散筒数值模拟与研究[J]. 流体机械, 2009, 37(10):38 - 41.
AI Zijian, CHEN Liaoyuan, WANG Xilai, et al. Numerical simulation and research on the diffused tube of fanner based on the FLUENT software[J]. Fluid Machinery, 2009, 37(10):38 - 41. (in Chinese)

5 王军, 姚瑞锋, 刘静,等. 低压轴流风机叶顶间隙对叶尖涡及外部性能的影响研究[J]. 流体机械, 2011, 39(9):26 - 29.
WANG Jun, YAO Ruifeng, LIU Jing, et al. Influence of tip clearance on external performance and tip leakage vortex of low-pressure axial fan[J]. Fluid Machinery, 2011, 39(9):26 - 29. (in Chinese)

6 田翠茹, 李宝宽. 叶顶间隙对轴流风机性能影响的大涡模拟研究[J]. 风机技术, 2018(1):33 - 38.
TIAN Cuiru, LI Baokuan. Large-eddy simulation study on effect of blade tip clearance on performance of the axial flow fan[J]. Fan Technology, 2018(1):33 - 38. (in Chinese)

7 刘洋, 杨志刚. 叶顶间隙对轴流风机内部流场影响的研究[J]. 风机技术, 2013(2):9 - 14.
LIU Yang, YANG Zhigang. Effect of blade tip clearance on the internal fluid field in axial-flow fan[J]. Fan Technology, 2013(2): 9 - 14. (in Chinese)

8 JANG C M, FURUKAWA M, INOUE M. Analysis of vortical flow field in a propeller fan by LDV measurements and LES—part Ⅰ: three-dimensional vortical flow structures[J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2001, 123(12):748 - 754.

9 JANG C M, FURUKAWA M, INOUE M. Analysis of vortical flow field in a propeller fan by LDV measurements and LES—part Ⅱ: unsteady nature of vortical flow structures due to tip vortex breakdown[J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2001, 123(12):755 - 761.

10 JANG C M, FURUKAWA M, INOUE M. Frequency characteristics of fluctuating pressure on rotor blade in a propeller fan[J]. JSME International Journal, 2003, 46(1):163 - 172.

11 王巍雄, 莫顺华, 陈馨,等. 导流罩安装位置对轴流冷却风扇性能的影响[J]. 风机技术,2007(1):5 - 7.
WANG Weixiong, MO Shunhua, CHEN Xin, et al. The effect of diversion cover position to the performance of axial flow cooling fan[J]. Fan Technology, 2007(1):5 - 7. (in Chinese)

12 陆志伟. 导流罩对轴流风扇性能的影响[D]. 武汉:华中科技大学, 2015:27 - 37.
LU Zhiwei. Influence of shroud on performance of axial flow fan[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015:27 - 37. (in Chinese)

13 丁国良, 胡俊伟. 导流罩对空调器室外机噪声的影响[J]. 机械工程学报, 2006, 42(3):136 - 141.
DING Guoliang, HU Junwei. Effect of the deflecting ring on the noise generated by an air conditioner outdoor set [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(3):136 - 141. (in Chinese)

14 王正, 刘志峰, 白连社,等. 导流罩对冰箱冷凝风机噪声的影响[J]. 机械工程学报, 2014,50(12):151 - 156.
WANG Zheng, LIU Zhifeng, BAI Lianshe, et al. Effect of deflecting ring on noise generated by axial fan of condenser in refrigerator[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(12):151 - 156. (in Chinese)

15 王嘉冰. 空调器风机内流中的旋涡流动及气动噪声预测[D]. 武汉:华中科技大学, 2006:34 - 36.
WANG Jiabing. Research on the vortices flow and the aerodynamic noise prediction of the air-conditioner's fan [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006:34 - 36. (in Chinese)

16 LI B, FORD S E, LI Y, et al. Development of a fan testing chamber for agricultural and horticultural fans in China[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2006, 22(1): 115 - 119.

(下转第 187 页)

Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 127: 495 – 505.
22 YALCIN H. Vision based automatic inspection of insects in pheromone traps[C]// Fourth International Conference on Agro-Geoinformatics, 2015: 333 – 338.
23 范一峰,王义平. 基于 Gabor 滤波和类内 PCA 的昆虫识别[J]. 计算机应用与软件, 2013, 30(4): 75 – 76.
FAN Yifeng, WANG Yiping. Insect recognition based on Gabor filter and with-in class PCA[J]. Computer Applications and Software, 2013, 30(4): 75 – 76. (in Chinese)
24 杨国国,鲍一丹,刘子毅. 基于图像显著性分析与卷积神经网络的茶园害虫定位与识别[J]. 农业工程学报, 2017, 33(6): 156 – 162.
YANG Guoguo, BAO Yidan, LIU Ziyi. Localization and recognition of pests in tea plantation based on image saliency analysis and convolutional neural network [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(6): 156 – 162. (in Chinese)
25 DING W, TAYLOR G. Automatic moth detection from trap images for pest management[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 123: 17 – 28.
26 KRIZHEVSKY A, SUTSKEVER I, HINTON G E. Imagenet classification with deep convolutional neural networks[C]// Advances in Neural Information Processing Systems, 2012: 1097 – 1105.
27 REN S, HE K, GIRSHICK R, et al. Faster R-CNN: towards real-time object detection with region proposal networks[C]// International Conference on Neural Information Processing Systems, 2015: 91 – 99.
28 LIU W, ANGUELOV D, ERHAN D, et al. Ssd: single shot multibox detector[C]// European Conference on Computer Vision, ECCV 2016, 2016: 21 – 37.
29 LIN T Y, GOYAL P, GIRSHICK R, et al. Focal loss for dense object detection[C]// Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2017: 2980 – 2988.
30 HE K, GKIOXARI G, DOLLÁR P, et al. Mask R-CNN[C]// Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2017: 2961 – 2969.
31 EVERINGHAM M, ESLAMI S M A, VAN GOOL L, et al. The pascal visual object classes challenge: a retrospective[J]. International Journal of Computer Vision, 2015, 111(1): 98 – 136.
32 LIN T Y, MAIRE M, BELONGIE S, et al. Microsoft COCO: common objects in context[C]// European Conference on Computer Vision. Springer, Cham, 2014: 740 – 755.
33 MACQUEEN J. Some methods for classification and analysis of multivariate observations[C]// Proceedings of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, 1967: 281 – 297.
34 宗世祥, 骆有庆, 许志春,等. 沙棘木蠹蛾性信息素林间诱蛾活性试验[J]. 北京林业大学学报, 2006, 28(6):109 – 112.
ZONG Shixiang, LUO Youqing, XU Zhichun, et al. Field trapping trials of sex pheromone for *Holcocerus hippophaecolus* (Lepidoptera:Cossidae)[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2006, 28(6):109 – 112. (in Chinese)
35 HOUGH P V C. Method and means for recognizing complex patterns: US3069654[P]. 1962 – 12 – 18.
36 GIRSHICK R. Fast R-CNN[C]// Computer Vision(ICCV), 2015 IEEE International Conference on. IEEE, 2015: 1440 – 1448.
37 HE K, ZHANG X, REN S, et al. Deep residual learning for image recognition[C]// Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2016: 770 – 778.

(上接第 142 页)

17 刘宣佐. 轴流风机数值模拟的若干问题探讨[D]. 杭州:浙江大学, 2015:34 – 51.
LIU Xuanzuo. Discussion and analysis on several issues about the numerical simulation of the axial flow fan[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015:34 – 51. (in Chinese)
18 YAKHOT V, ORSZAG S A, THANGAM S, et al. Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique[J]. Physics of Fluids, 1992, 4(7):1510 – 1520.
19 吴宗泽. 机械设计师手册(上册)[M]. 北京:机械工业出版社, 2006:841.
20 郭嫱. 叶顶间隙泄漏涡流及空化流场特性研究[D]. 北京:中国农业大学, 2017:22 – 26.
GUO Qiang. Study on characteristics of the blade tip leakage vortex flow and the cavitating flow field[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017:22 – 26. (in Chinese)
21 HUNT J C R, WRAY A A, MOIN P. Eddies, streams, and convergence zones in turbulent flows[C]// Center for Turbulence Research Proceedings of the Summer Program, 1988:193 – 208.
22 于雷, 王成军, 赵冬凯,等. 中心分级燃烧室冷态流场的大涡模拟[J]. 沈阳航空航天大学学报, 2017, 34(3):43 – 49.
YU Lei, WANG Chengjun, ZHAO Dongkai, et al. Large-eddy simulation of non-reacting flow in a central staged combustor[J]. Journal of Shenyang Aerospace University, 2017, 34(3):43 – 49. (in Chinese)
23 邓书辉. 低屋面横向通风牛舍环境数值模拟及优化[D]. 北京:中国农业大学, 2015:26 – 27.
DENG Shuhui. Numerical simulation and optimization of environment in low profile cross ventilated dairy cattle barn[D]. Beijing: China Agricultural University, 2015:26 – 27. (in Chinese)